

**Partialmodelle der Ablaufplanung im Krankenhaus
auf empirischer Grundlage**

Inaugural-Dissertation

**zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors
der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften
(Dr. rer. pol.)**

der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen - Nürnberg

**vorgelegt von Dipl.-Ing. Lothar Gierl
aus München**

1976



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546220_0002

**Partialmodelle der Ablaufplanung im Krankenhaus
auf empirischer Grundlage**

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors
der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften
(Dr. rer. pol.)

der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen - Nürnberg

vorgelegt von Dipl.-Ing. Lothar Gierl
aus München



Referent: Prof. Dr. M.Meyer
Korreferent: Prof. Dr. H.Steinrann

Nürnberg, den 21.12.1976

INHALTSVERZEICHNIS

0. PROBLEMSTELLUNG	1
1. GRUNDLAGEN DER ABLAUFPLANUNG IM KRANKENHAUS	5
1.1 <u>Die Ebenen der Ablaufplanung im Krankenhaus</u>	6
1.2 <u>Erfolgsmessung im Krankenhaus</u>	9
1.3 <u>Operationale Zielfunktionen</u>	11
1.4 <u>Das Datenproblem</u>	12
2. LEISTUNGSELEMENTE	14
2.1 <u>Definition des Leistungselementes</u>	14
2.2 <u>Leistungselemente als Basis der Ablaufplanung</u>	14
2.3 <u>Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Dauer medizinischer Tätigkeiten</u>	16
2.3.1 Die Dauern medizinischer Tätigkeiten als Zufallsvariable	16
2.3.2 Die logarithmische Normalverteilung	18
2.3.2.1 Definition	18
2.3.2.2 Schätzung der Parameter	20
2.3.2.3 Empirische Untersuchungen in zwei Krankenhäusern	22
2.4 <u>Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Material- und Medikamentenverbrauch</u>	26
2.5 <u>Die Leistung als Kombination von Leistungselementen</u>	27
2.5.1 Definition der Leistung	27
2.5.2 Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Leistungsanforderungen	27

3. LEISTUNGSSTELLEN	29
3.1 <u>Definition der Leistungsstelle</u>	29
3.2 <u>Ablaufplanung für eine Leistungsstelle am Beispiel der Röntgenabteilung der Medizinischen Klinik der Universität Erlangen-Nürnberg</u>	29
3.2.1 Problemstellung	37
3.2.2 Struktur- und Ablaufanalyse der Röntgenabteilung	38
3.2.2.1 Erzeugung von Röntgenstrahlen und Röntgenaufnahmen	38
3.2.2.1.1 Technik	38
3.2.2.1.2 Strahlenschutz	38
3.2.2.1.3 Röntgenaufnahmen	42
3.2.2.2 Struktur	43
3.2.2.2.1 Arbeitsräume	43
3.2.2.2.2 Arbeitsplätze	45
3.2.2.2.3 Personal	45
3.2.2.3 Arbeitsablauf	46
3.2.2.3.1 Anforderungseingang	46
3.2.2.3.2 Steuerung von Anforderungen und Patientenfluß (Sortieren 1)	52
3.2.2.3.3 Röntgenuntersuchung	55
3.2.2.3.4 Entwickeln der Filme	62
3.2.2.3.5 Kontrolle der Aufnahmen	63
3.2.2.3.6 Ordnen und Etikettieren der Filme (Sortieren 2)	64
3.2.2.3.7 Befundung	65
3.2.2.3.8 Schreiben der Befunde	67
3.2.2.3.9 Befundweitergabe	69
3.2.2.3.10 Verwaltung, Versorgung	69
3.2.2.3.11 Gesamtablauf	70

3.2.3 Daten	76
3.2.3.1 Datenerhebung	76
3.2.3.2 Datenaufbereitung	78
3.2.3.2.1 Tätigkeitsdauern	78
3.2.3.2.2 Materialverbrauch	95
3.2.3.2.3 Anforderungsanfall	95
3.2.4 Modellbeschreibung	124
3.2.4.1 Das Simulationsmodell	124
3.2.4.2 Realisation des Modells mit GPSS/FORTAN	133
3.2.4.3 Aussagemöglichkeiten des Modells	140
3.2.4.4 Beurteilung des Modells	142
3.2.4.5 Auslegung und Bemessung der Simulation	143
3.2.5 Ergebnisse	148
3.2.5.1 Gegenwärtiger Zustand der Rönt- genabteilung	151
3.2.5.2 Erhöhung der Zahl der täglichen Anforderungen	157
3.2.5.3 Beschleunigung des Patienten- ankunftsprozesses	162
3.2.5.4 Quantitative Änderungen der Ein- stellstrategien	162
3.2.5.5 Änderungen der Einbestellstrategien bezüglich der Dauer der Unters- suchungen	169
3.2.5.6 Kombination der günstigsten Strategie- alternativen	174
3.2.5.7 Die Wirkung struktureller Änderungen am Beispiel des Sortieren 2	176
3.2.5.8 Kombination der günstigsten Strate- gien und des Vorverlegens von Sortieren 2	179
3.2.5.9 Erhöhung der Zahl der täglichen An- forderungen bei abgeändertem Modell	182

3.2.5.10 Abschätzung der Ergebnisse unter Berücksichtigung von Krankheit bzw. Urlaub des Personals	185
3.2.6 Konsequenzen für die Medizinische Klinik	187
4. SIMULTANE ABLAUFPLANUNG FÜR MEHRERE LEISTUNGSSTELLEN	190
4.1 <u>Problemstellung</u>	190
4.1.1 Zentrale Simultanplanung	191
4.1.2 Prämissen der Modellbildung	193
4.1.3 Gang der Untersuchung des Reihenfolge- und Terminierungsproblems	196
4.2 <u>Existierende Verfahren und Lösungsvorschläge</u>	197
4.3 <u>Begründung des vorgeschlagenen Verfahrenstyps</u>	200
4.4 <u>Konstruktion von Leistungsreihenfolgen für Patienten</u>	204
4.4.1 Medizinisch zulässige Leistungsreihenfolgen	204
4.4.2 Leistungsreihenfolge-Prioritäten	207
4.4.3 Belastung des Patienten	207
4.5 <u>Graphentheoretische Interpretation des Problems</u>	210
4.5.1 Abbildung des Reihenfolge- und Terminierungsproblems als Graph	210
4.5.2 Lösungsfindung mittels disjunkter Graphen	214
4.6 <u>Lösung des Reihenfolge- und Terminierungsproblems</u>	225
4.6.1 Bereitstellung der Ausgangsdaten	225
4.6.2 Formale Darstellung des Problembeispiels	227

4.6.3	Bestimmung der ersten, zulässigen Lösung durch ein heuristisches Verfahren	229
4.6.4	Ein Branch-and-Bound-Verfahren zur Ermittlung der optimalen Lösung	232
4.6.4.1	Die Branch-and-Bound-Methode	232
4.6.4.1.1	Die allgemeine Methode	232
4.6.4.1.2	Zerlegungsstruktur	233
4.6.4.1.3	Zerlegungsprozeß	233
4.6.4.1.4	Beschränkungsfunktion	235
4.6.4.1.5	Entscheidungsprozeß	235
4.6.4.2	Der Entscheidungsprozeß des Problems	236
4.6.4.3	Aufsuchen der optimalen Lösung für das Beispiel in Abschnitt 4.6.3	240
4.7	<u>Ein Approximationsverfahren zur rechentechnischen Beschleunigung des Algorithmus</u>	243
4.8	<u>Reduktion des Graphen $Z \cup D$</u>	245
4.9	<u>Stochastische Tätigkeitsdauern</u>	247
4.9.1	Zur Notwendigkeit eines stochastischen Reihenfolge- und Terminierungsmodells	247
4.9.2	Deterministische Äquivalente	251
4.9.3	Die Verwendung von stochastischen Netzplantechnik-Verfahren mit deterministischer Vorgangsfolge und stochastischen Tätigkeitsdauern	255
4.10	<u>Auswirkung von Notfällen auf die Leistungsstellen</u>	256
4.10.1	Notfallankünfte	256
4.10.2	Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten bestimmter Notfallarten	258
4.10.3	Wahrscheinlichkeiten für die Inanspruchnahme von Leistungsstellen auf Grund bestimmter Notfälle	261
4.10.4	Beanspruchung von Leistungsstellen durch Notfälle	262

4.10.5 Berücksichtigung von Notfällen in der Terminplanung	264
4.11 <u>Bedienungszeitrestriktionen</u>	267
4.12 <u>Allgemeine Zielfunktionen</u>	268
4.13 <u>Das Rechnerprogramm</u>	272
4.14 <u>Beispiele aus dem Stadt- und Kreiskrankenhaus Kulmbach</u>	274
4.14.1 Datenbasis	274
4.14.2 Beispiele	278
5. KRANKENHAUSGESAMTMODELLE	286
5.1 <u>Langfrist-, Kurzfristmodelle</u>	286
5.2 <u>Langfristmodelle</u>	286
5.2.1 Statische Betrachtungsweise	286
5.2.2 Dynamische Betrachtungsweise	288
5.3 <u>Ablaufplanung im gesamten Krankenhaus (Kurzfristmodelle)</u>	291
5.4 <u>Layoutplanung als Beispiel für die Interdependenz von Langfrist- und Kurzfristplanung im Krankenhaus</u>	293
5.4.1 Layoutplanung mit HEROS	293
5.4.2 Layoutplanung mit dialogfähigen Verfahren	305
5.4.3 Die Ergebnisse der Layoutplanung im Simulationsmodell der Röntgenabteilung von Abschnitt 3.2	307
6. REALISATIONSMÖGLICHKEITEN FÜR ABLAUFPLANUNGSVERFAHREN IM KRANKENHAUS	309
Literaturverzeichnis	311

O. PROBLEMSTELLUNG

Das Anwachsen der Aufwendungen für das Gesundheitswesen in der Bundesrepublik ist zum Dauerthema der öffentlichen Diskussion geworden. Während im Jahr 1960 die Ausgaben der gesetzlichen Krankenkassen noch 8.97 Milliarden Mark betrugen, wurden 1974 schon 50.70 Milliarden Mark aufgewendet.

Noch dramatischer war der Kostenanstieg in den Krankenhäusern. Hier war innerhalb des gleichen Zeitraumes ein Sprung von 1.57 Milliarden DM auf 15.2 Milliarden DM zu verzeichnen.¹⁾

Diese Entwicklung hat dazu geführt, Überlegungen über die Ursachen der Kostensteigerungen und wirkungsvolle Maßnahmen zu ihrer Dämpfung anzustellen.

Dabei konzentriert sich das Interesse auf zwei einander durchdringende Diskussionsebenen.

Einmal stehen die zwei Themenkreise

- Reformen im Gesundheitswesen außerhalb der Krankenhäuser
 - Reformen in den Krankenhäusern
- zur Debatte.

Eine zweite Diskussionsebene besteht in der Erörterung

- politischer Fragen wie Abbau der Hierarchie im Krankenhaus, Arzneimittelrecht, Arzteeinkommen, ungleichmäßige Arztdichte usw.
- organisatorischer Fragen wie Verweildauer, medizinisch-technische Ausstattung der niedergelassenen Ärzte, Kosten-erstattungsrecht, Kapazitätsauslastung usw.

Beide Diskussionsebenen und ihre Teilaspekte sind vielfältig ineinander verflochten. Im Folgenden soll dennoch der Versuch unternommen werden, einen Bereich einer gesonderten Untersuchung zu unterziehen. Es ist dies das Problem, mit Hilfe von Methoden des Operations Research Arbeitsabläufe im Krankenhaus modellhaft abzubilden, um Aussagen und Ent-

1) Der Spiegel, Nr. 19 (1975), S. 57 ff.

scheidungsgrundlagen bezüglich einer möglichst effizienten Gestaltung dieser Abläufe zu erhalten. Mit dieser Problematik ist im wesentlichen der kurzfristige Aspekt der Krankenhausplanung angesprochen. Aufgabe dieser kurzfristigen Ablaufplanung ist es, im Rahmen langfristiger Gegebenheiten zur Erreichung optimaler Periodenziele durch optimalen Einsatz von Menschen und Sachmitteln beizutragen.¹⁾ Das bedeutet insbesondere die Planung des zeitlichen Ablaufs der Erstellung von medizinischen Dienstleistungen im Krankenhaus.²⁾

Allerdings zeigt sich, daß eine scharfe Trennung von kurzfristiger Ablaufplanung und langfristiger Investitionsplanung nicht möglich ist, da beide voneinander abhängen. Dies trifft insbesondere für die in Abschnitt 6 aufgeführten Gesamtkrankenhausmodelle zu.

Der kurzfristige Aspekt der Krankenhausplanung ist insofern von größter Bedeutung, da aufgrund der günstigen Betten/Einwohner-Relation³⁾ in der Bundesrepublik in Zukunft wohl nur noch wenige ausgesprochene Bettenkliniken gebaut werden dürften. Es scheint sich eher die Möglichkeit des Abbaus von Bettenkapazität bei gleichzeitiger Spezialisierung der Betten (poststationär, intensiv, normal) herauszukristallisieren.⁴⁾ Damit rückt das Problem der kurzfristigen Ablaufplanung in den Mittelpunkt des Interesses.⁵⁾

Die Notwendigkeit der Ablaufplanung ergibt sich aber auch

1) Vgl. Hill, (1966), S. 21.

2) Dies ist eine Definition der Ablaufplanung, die praktisch identisch ist mit der von Ellinger (Ellinger (1959), S. 17) für den Fertigungsbetrieb entwickelten.

3) Der sogenannte "Bettenberg" (siehe dazu etwa Seeler 1973)) ist allerdings zu relativieren, da es erhebliche, regionale Diskrepanzen bezüglich der Betten/Einwohner-Zahl gibt.

4) Vgl. dazu etwa Scholmer (1973), S. 114; Seeler (1973).

5) Die Notwendigkeit der Analyse und Verbesserung von Betriebsabläufen im Krankenhaus (Ablaufplanung) ist auch von den politischen Institutionen erkannt worden (siehe etwa Deutscher Bundestag (1975), S. 10).

aus den Mängeln gegenwärtiger Planungs- und Organisationspraktiken. Eichhorn zählt folgende auf¹⁾:

- fehlende oder mangelhafte Planung
- fehlende, mangelhafte oder nicht ausgeführte Organisation
- fehlende oder lückenhafte Kontrolle
- unzureichende Zentralisierung gleichartiger, für mehrere Leistungsstellen durchzuführende Tätigkeiten
- unzumutbarer Einsatz von Personal
- Fehlen von technischen Hilfsmitteln
- Einsatz von unzumutbaren, technischen Hilfsmitteln.

Diese Mängel des Arbeitsablaufs haben

- verlängerte Verweildauern
- erhöhte medizinische Fehlerquoten
- Leerzeiten in den Leistungsstellen
- fehlgeleitete Investitionen

zur Folge. In der Konsequenz tragen diese Mängel²⁾ zu den bekannten hohen Kostensätzen im Krankenhaus bei. Für Teilbereiche des angeschnittenen Problems bieten die Methoden des Operations Research Lösungsmöglichkeiten zur Dämpfung des Kostenanstiegs an.³⁾

Daher ist es das Ziel der vorliegenden Arbeit

- die Problematik der Ablaufplanung im Krankenhaus in einem vierstufigen Schema zu strukturieren,
- dazu an Hand von realisierten Beispielen die Möglichkeiten der Modellbildung⁴⁾ für die Ablaufplanung in Kranken-

1) Eichhorn II (1974), S. 308.

2) Die Ursachen der Mängel sind größtenteils in der tradierten Struktur unseres Gesundheitssystems zu suchen, so z. B. auch der inneren Krankenhausstruktur (Behandlung von schwerkranken, bettlägerigen, nichtbettlägerigen und lediglich zu diagnostischen Zwecken einbestellten Patienten), sowie der starren, hierarchischen Personalstruktur. Siehe dazu etwa Scholmer (1973).

3) Öffentlichkeitswirksame Einzelaktionen, wie die Einführung der Selbstbedienung beim Essen für gehfähige Patienten ("Selbstbedienung im Krankenhaus", Nürnberger Nachrichten, 4.8.1975) können die komplexen Probleme nicht lösen.

4) Die Darstellung der Modelle erstreckt sich nicht auf die detaillierte, rechen-technische Ausführung. Es wird lediglich der prinzipielle Aufbau der auf dem Rechner implementierten Programme skizziert.

- häusern mit OR-Verfahren aufzuzeigen,
- Probleme der Datenerfassung und -analyse im Krankenhaus darzustellen.

Es soll ferner gezeigt werden, daß OR-Verfahren, die mit Erfolg in Dienstleistungs- oder Industriebetrieben eingesetzt wurden, in manchen Fällen direkt, in anderen mit mehr oder weniger tiefgreifenden Änderungen im Krankenhausbereich angewandt werden können.

1. GRUNDLAGEN DER ABLAUFPLANUNG IM KRANKENHAUS

Grundsätzlich bieten sich für die Planung im Krankenhaus zwei verschiedene Vorgehensmöglichkeiten an:

1. Simultanplanung für das gesamte Krankenhaus
2. Sukzessivplanung mit Partialmodellen

Wege der äußerst komplexen Struktur eines Krankenhauses ist eine sämtliche Aspekte umfassende Planung wohl noch nirgends verwirklicht worden. Dagegen existieren Modelle, mit denen Teilaspekte auf der Ebene des Gesamtkrankenhauses geplant werden können, z.B. Patienteneinbestellung. Die Sukzessivplanung unterteilt das Entscheidungsfeld in seiner zeitlichen Dimension in nacheinander auszuführende Entscheidungen in einem hierarchischen Planungssystem.¹⁾

Das bedeutet, daß die Ebene der langfristig wirkenden Entscheidungen den Spielraum des mittelfristigen Entscheidungsfeldes, das mittelfristige Entscheidungsfeld den des kurzfristigen bestimmt.

Es läßt sich jedoch nicht ausschließlich eine einseitig ausgerichtete Abhängigkeit der Teilentscheidungsfelder feststellen. Vielmehr wirken auch kurzfristige Entscheidungen auf mittel- und langfristige ein. So determiniert einerseits die Entscheidung für die Erweiterung eines Labors durch einen Mehrkanalautomaten den Spielraum des Labors selbst, andererseits könnte eine sich später einstellende ungenügende Auslastung dieses Gerätes zu einer Verteuerung der Einzelleistung und damit zu einer Verschlechterung des Betriebsergebnisses führen.

Ähnliche Interdependenzen gelten für die sachliche Dimension des Entscheidungsfeldes. Entscheidungen über die Art und den Umfang bestimmter Geräte zur Erbringung bestimmter medizinischer Leistungen hängen sowohl von deren technischen Leistungsdaten, als auch von den baulichen Gegebenheiten und der Qualifikation des Personals ab.

1) Siehe Steinmann u.a. (1974), S. 12 ff.

Umgekehrt bestimmen diese Leistungen beispielsweise die Reihenfolge, in der Patienten untersucht werden müssen.

Die vorliegende Arbeit legt in ihrem Aufbau die sachliche Dimension des Entscheidungsfeldes im Krankenhaus zugrunde, da nur dieser Aspekt im Krankenhaus empirisch zugänglich war.

Außerdem sollen nicht sämtliche Interdependenzen der Teilentscheidungsfelder erfaßt werden, sondern hauptsächlich solche, die sich auf den oben definierten Begriff der Ablaufplanung zurückführen lassen.

1.1 Die Ebenen der Ablaufplanung im Krankenhaus

Das Entscheidungsfeld der Ablaufplanung im Krankenhaus wird demgemäß in verschiedene Teilfelder aufgespalten:

Sind vom Krankenhausträger Struktur und Ausstattung eines Krankenhauses festgelegt, so geht es auf der Ebene des Gesamtkrankenhauses darum, den Ablauf in sämtlichen Teilbereichen des Krankenhauses so abzustimmen, daß ein optimales Ergebnis erzielt wird. Die Teilbereiche des Krankenhauses können u.U. wiederum zu funktionalen Einheiten zusammengefaßt werden, für die eine gesonderte und detaillierte, kurzfristige Planung möglich ist, z.B. für sämtliche diagnostische Teilbereiche des Krankenhauses oder sämtliche Stationen. Diese Planung stützt sich nun auf die Gegebenheiten ihrer Teilbereiche, im folgenden Leistungsstellen genannt. Leistungsstellen sind das Labor, die Röntgenabteilung usw.

Andererseits legt die Planung für mehrere Teilbereiche den Arbeitsablauf von einzelnen Leistungsstellen fest. Sie schreibt beispielsweise vor, zu welchen Zeiten eine Leistungsstelle besetzt sein muß.

Die medizinische und monetäre Bilanz der Leistungsstellen ist von der Art und dem Umfang der Erstellung von einzelnen, vom Krankenhaus abrechenbaren Leistungen bestimmt, z.B. Aufnahme eines Elektrokardiogramms.

Die Art und Weise wie Leistungen erstellt werden, z.B. welche medizinische Güte von Tests im klinisch-chemischen Labor gefordert wird, erfordern ganz spezielle Leistungselemente, die durch Tätigkeiten des Personals oder durch vom Personal bediente Geräte erbracht werden. Umgekehrt beeinflussen die technischen Daten dieser Geräte bzw. die Qualifikation des Personals die Leistungserstellung.

Die geschilderten Zusammenhänge lassen sich grob gemäß Abb. 1.1 - 1 darstellen.

Danach hat man es mit 4 Planungsebenen zu tun:

1. Leistungselement
2. Leistungsstelle
3. Leistungsstellengruppe (mehrere Leistungsstellen)
4. Gesamtkrankenhaus

Die Leistung selbst induziert durch ihre Verordnung durch den Stationsarzt bzw. durch die alleinige Anwesenheit des Patienten Tätigkeiten auf diesen Ebenen. Die Leistungserstellung bildet also das bewegende Moment und den Ausgangspunkt sämtlicher Handlungen im Krankenhaus.

Der Gang der Untersuchung ist so angelegt, daß von der Ebene der Leistungselemente aufsteigend zum Gesamtkrankenhaus Ablaufplanungspartialmodelle vorgestellt werden und ihre Verflechtung untereinander dargestellt wird. Diese "von unten nach oben" gerichtete Vorgehensweise war notwendig, da in den nachfolgenden Modellen von einer zunächst fest vorgegebenen Krankenhausstruktur ausgegangen werden mußte. Die notwendigen Planungsdaten mußten in empirischen Untersuchungen jeweils auf den unter der analysierten Planungsebene liegende Ebenen gewonnen werden. Damit war es erst möglich, ein Modell zu bilden.

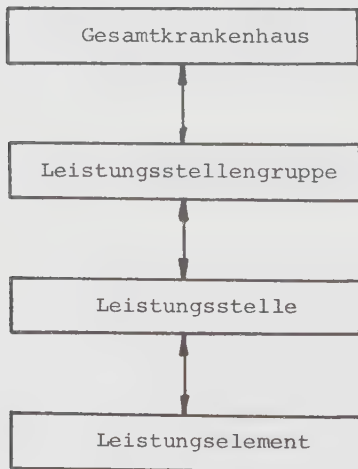


Abb. 1.1 - 1: Die Ebenen der Ablaufplanung im Krankenhaus

1.2 Erfolgsmessung im Krankenhaus

Ist die Erfolgsmessung in gewerblichen Betrieben schon problematisch, kommen im Krankenhaus noch zusätzliche Schwierigkeiten hinzu. Bekanntlich ist auf Grund der besonderen Struktur des Gesundheitswesens in der Bundesrepublik und in vielen anderen Ländern das Erfolgsmaß Gewinn der gewerblichen Wirtschaft nicht anwendbar.¹⁾ Nachfrage und Gütererzeugung werden nicht über einen Marktmechanismus geregelt, sondern die Leistungen des Gesundheitswesens bestimmen sich (von gewissen Ausnahmen abgesehen) aus der Befriedigung des Bedarfs an medizinisch-pflegerischen Dienstleistungen der Bevölkerung.²⁾ Auf welche Weise und in welchem Umfang dieser Bedarf³⁾ befriedigt wird, ist letztlich eine politische Frage.

Die medizinische Zielsetzung der Heilung bzw. Vorbeugung konkurriert jedoch mit wirtschaftlichen Zielen.

Zwangsläufig muß damit zu einem anderen Wirtschaftlichkeitsbegriff übergegangen werden. Hierzu bietet sich eine von Steinmann u.a. entwickelte Definition⁴⁾ an: "Das Wirtschaftlichkeitsprinzip besteht in der Aufforderung, ein bewertetes, gerechtfertigtes Güterbündel unter Minimierung der Kosten zu produzieren."

Auf das Krankenhaus übertragen bedeutet das die Produktion von medizinischen und pflegerischen Dienstleistungen zu minimalen Kosten.⁵⁾

Zu dem betrieblichen Werteverzehr kommen nach Stein-

1) Eichhorn II (1974), S. 200 ff.

2) Vgl. Adam (1971), S. 64; Eichhorn II (1974), S. 16.

3) Auf die Entstehung dieses Bedarfs soll hier nicht eingegangen werden.

4) Steinmann u.a. (1975), S. 82.

5) Eine ähnliche Definition ist auch in Deutscher Bundestag (1975), S. 33, zu finden.

mann noch die Kosten externer Effekte.¹⁾ Im Falle des Krankenhauses sind dies:

- Beeinträchtigung des individuellen Wohlbefindens, z.B. eingeschränkte Mobilität der Patienten
- Ausfall an Arbeitsstunden
- materielle Lasten in Form von Krankenhausbeiträgen.

Diese Definition ist insofern geeignet, als sie auf einem Kostenbegriff basiert, der den "gesamten Kontext gerechtfertigter Bedürfnisse mit einbezieht"²⁾.

Es kann zwar die Ablaufplanung Entscheidungsgrundlagen für einen effizienten Einsatz von Investitionsmitteln auf der Ebene des Einzelkrankenhauses liefern, zur Feststellung des gesamtgesellschaftlichen Nutzens derartiger Investitionen sind jedoch weitergehende Überlegungen wie z.B. Kosten-Nutzen-Analysen bzw. Kosten-Risiko-Analysen (etwa Herzzentrum oder Kreislaufvorsorgeuntersuchungen) auf einer höheren Ebene notwendig.³⁾ Derartige Untersuchungen liefern letztlich die Rechtfertigung für die politischen Entscheidungen, spezielle medizinische oder pflegerische Dienstleistungen anzubieten bzw. nicht anzubieten.⁴⁾

1) Steinmann u.a., a.a.O., S. 82.

2) Ebenda, S. 81.

3) Vgl. Eichhorn II (1974), S. 202; Alter (1973); Meyer (1976).

4) Kosten-Risiko-Analysen basieren auf einem entscheidungslogisch orientierten Wissenschaftsbegriff. Es ist jedoch sicher möglich, ihre Ergebnisse in einen kommunikativ orientierten Planungsprozeß einzubringen.

1.3 Operationale Zielfunktionen

Es zeigt sich, daß oftmals auf die Bewertung mit Kosten verzichtet werden muß, so daß man sich nur auf Ersatzkriterien zurückziehen kann. Dies ist dann der Fall, wenn empirisch keine Kostensätze gewonnen werden können. In jedem Fall sind aber operationale Ziele zu definieren, die recht abstrakte Zielvorstellungen in Zielfunktionen mit geringerem Abstraktionsgrad transformieren.¹⁾ Vergrößerungen bestimmter, komplexer Tatbestände müssen in Kauf genommen werden. Sie sind aber durch Parametrisierung von Modellen in ihren Auswirkungen abschätzbar.

An operationale Zielfunktionen müssen folgende Anforderungen gestellt werden²⁾:

1. Entscheidungstatbestände müssen wohl definiert sein.
2. Es muß eine operationale Wertordnung anzugeben sein (Maßstab).
3. Es müssen technische Alternativen möglich sein.
4. Der Beitrag, den Entscheidungen zur Zielfunktion leisten, muß meßbar sein.

Tatbestände wie Heilerfolg, psychisches Wohlbefinden der Patienten u.a.m. sind somit schwer als Kriterien einer Zielfunktion vorstellbar. Dagegen genügen Tätigkeitsdauern, Personalstand, Zahl an Geräten, Verbrauchsmaterialmengen diesen Anforderungen, obwohl das Problem des gemeinsamen Bewertungsfaktors auftaucht. In den Abschnitten 3 - 5 werden derartige unterschiedliche Zielfunktionen verwendet. Dabei muß aber auf eine Bewertung der Entscheidungsvariablen mit Kosten verzichtet werden. Es wird dann auf Ersatzkriterien wie Transportaufwand, Durchlaufzeit usw. ausgewichen, in denen mittelbar monetäre Größen zum Ausdruck kommen. Daß derartige Ersatzkriterien durchaus sinnvoll sind, zeigen Anwendungen im industriellen Bereich.³⁾ Oftmals läßt sich

1) Vgl. Eichhorn (1974), S. 27.

2) Adam (1971), S. 14.

3) Etwa Diegelmann (1975); Hardeck, Schmid (1974); Mensch (1968).

nicht einmal eine sinnvolle, geschlossene Zielfunktion angeben. Man ist dann gezwungen, Entscheidungen durch den Vergleich verschiedener Zielkriterien vorzunehmen.¹⁾

1.4 Das Datenproblem

Im Gegensatz zur Ablaufplanung in gewerblichen Betrieben stellen sich im Krankenhaus zusätzliche Datenprobleme ein. Während z.B. in der Literatur über Ablaufplanung fast ausschließlich davon ausgegangen wird, daß die Abarbeitungsdauern deterministisch sind bzw. zu vernachlässigende Varianzen aufweisen²⁾, ist bei medizinischen Tätigkeitsdauern davon auszugehen, daß sie Zufallsverteilungen gehorchen. Darüber hinaus ist in der Regel in der betrieblichen Ablaufplanung ein eindeutiger, deterministisch-funktionaler Zusammenhang zwischen einer bestimmten Tätigkeit und ihrem Ergebnis gegeben. So entsteht beispielsweise auf einer Werkzeugmaschine in einem Vorgang stets aus einem Rohling eine Kurbelwelle für einen Fahrzeugmotor. Im Krankenhaus ist das Ergebnis einer Tätigkeit nicht immer determiniert. Für eine Operation werden unterschiedliche Mengen von Blutkonserven mit unterschiedlichen Blutgruppen verbraucht, im Laufe einer Röntgenuntersuchung können verschiedene Mengen und Formate von Röntgenfilmen entstehen. D.h. die mengenmäßigen und qualitativen Bedarfe an Verbrauchsmaterial und auch das Ergebnis der entsprechenden Tätigkeit sind Zufallsvariable.

Der Grund für die Besonderheiten liegt in der speziellen Natur dieser Tätigkeiten, die sich ja nicht auf Werksstücke, sondern auf Menschen beziehen. Da die Spezies Mensch bekanntlich eine große Variationsbreite bezüglich ihrer biologischen und physiologischen Gegebenheiten aufweist, ist es dann nicht weiter verwunderlich, daß Tätigkeiten, die auf diese Gegebenheiten Rücksicht nehmen müssen, folglich diese Variationsbreite widerspiegeln, d.h. Zufällen unter-

1) Vgl. Abschnitt 3.2.

2) Vgl. etwa Bakshi, Arora (1969); Day, Hottenstein (1970).

liegen. Darüber hinaus überlagern sich zusätzlich stochastische, pathologische bzw. traumatische Einwirkungen auf den menschlichen Organismus. Die Konsequenz ist, daß bei allen Untersuchungen im Krankenhaus umfangreiche Datenerhebungen vorzunehmen sind.

Die Ergebnisse der Datenerhebung bestimmen dann unter Umständen sogar, welche Methoden zur Modellbildung herangezogen werden.

Ergibt sich z.B., daß die Zwischenankunftszeiten und Abfertigungszeiten in einem Warteschlangenmodell nicht negativ-exponential-verteilt sind, so lassen sich die einfachen analytischen Formeln der Warteschlangentheorie für Systeme vom Typ $(M/M/m)^{1)}$ nicht mehr verwenden, d.h. es muß bei komplexen Systemen unter Umständen auf Simulationsverfahren zurückgegriffen werden.

1) Es ließ sich nicht vermeiden, im folgenden unterschiedliche Variablen oder Konstanten mit denselben Symbolen zu bezeichnen. Dies geschieht aber ausschließlich so, daß in der Arbeit jeweils höchstens ein Symbol in einem Abschnitt erscheint. Um Verwechslungen vorzubeugen, wird an geeigneter Stelle auf eine Bedeutungsänderung stets deutlich hingewiesen.

2. LEISTUNGSELEMENTE

2.1 Definition des Leistungselementes

Die Basis für die Abläufe im Krankenhaus bilden die Leistungselemente. Es sind dies medizinische oder pflegerische Tätigkeiten, die zur Erstellung einer Leistung unmittelbar beitragen und die noch sinnvoll unterschieden werden können.¹⁾

Als Beispiel möge die Erstellung der Leistung Thoraxaufnahme in einer Röntgenabteilung dienen (Abb. 2.1 - 1). Sie setzt sich aus 14 einzelnen Leistungselementen zusammen. Allerdings kann die Leistung Thoraxaufnahme auch mehr als 14 Leistungselemente enthalten, da bei Fehlaufnahmen die Untersuchung wiederholt wird.²⁾

Leistungselemente im obigen Sinn sind auch die Durchführung einer Operation, die Erstellung eines EKG u.a.m. Die Leistungselemente können also sehr verschieden bezüglich Dauer, Ergebnis, Materialverbrauch, personellem und apparativem Aufwand sein.

2.2 Leistungselemente als Basis der Ablaufplanung im Krankenhaus

Wie Abb. 2.2 - 1 zeigt, setzen sich die einzelnen Leistungen, die im Krankenhaus erstellt werden, jeweils aus unterschiedlichen Leistungselementen zusammen. Die Art und die Dauer der Leistungselemente bestimmen dadurch auch den Ablauf in den Leistungsstellen des Krankenhauses, in denen die entsprechenden Leistungen ausgeführt werden. Deren Ka-

-
- 1) Eine analoge Definition wird von Kilbride, Wester (Kilbride, Wester (1962), S. 70) für die Arbeitselemente in der Fließfertigung angegeben. Darin wird als Arbeitselement eine nicht weiter teilbare Arbeitseinheit bezeichnet, über die hinaus eine Unterteilung der Fließarbeit nicht mehr sinnvoll ist.
 - 2) Auf den Ablauf der Erstellung einer Röntgenaufnahme wird in Abschnitt 4.2 detailliert eingegangen.

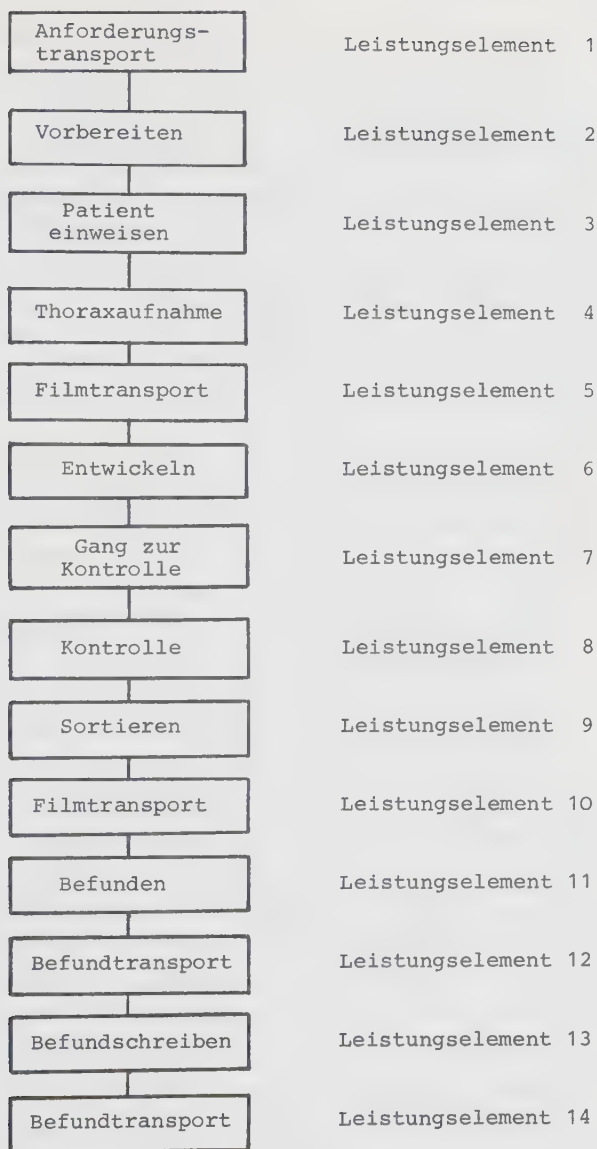


Abb. 2.2 - 1: Leistungselemente einer Thoraxanforderung

pazität hat nun wiederum Auswirkungen auf den Arbeitsablauf in anderen Leistungsstellen (z.B. Labor $\leftrightarrow$ Stationen) und damit auf den Ablauf des gesamten Krankenhauses.

Der Einfluß der Leistungselemente ist nun nicht nur zeitlicher Art, sondern, wie schon erwähnt, auch bezüglich des Materialverbrauches wirksam. Darüber hinaus bestimmen die Leistungselemente die personelle und apparative Ausstattung. Beispielsweise sind für bestimmte Operationen eine definierte Zahl von Ärzten, Schwestern, Anästhesisten, sowie Geräten und ein Operationssaal mit einer gewissen Mindestgröße notwendig.

Für die Ablaufplanung ist nun besonders der zeitliche Verlauf und der Materialverbrauch für ein Leistungselement von Interesse.

2.3 Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Dauer medizinischer Tätigkeiten

2.3.1 Die Dauern medizinischer Tätigkeiten als Zufallsvariable

Da die Leistungselemente durch Tätigkeiten des medizinischen Personals entstehen, richtet sich die Frage des zeitlichen Verlaufs auf die Bestimmung der Dauer medizinischer Tätigkeiten. Wie schon erwähnt, ist die Dauer einer Tätigkeit im Krankenhaus notwendigerweise eine Zufallsvariable, deren Varianzen in der Regel so groß sind, daß sie nicht mehr vernachlässigt werden können. Begnügt man sich dennoch etwa mit Mittelwerten, treten bei Ergebnissen der Ablaufplanung, insbesondere komplexer Systeme, beträchtliche Fehler auf.¹⁾

Es ist daher unumgänglich, die Verteilungen der Dauer medizinischer Tätigkeiten zu ermitteln. Der Aufwand bezüglich der Erhebung dieser Daten ist selbst bei Leistungsstellen, die nur wenige verschiedene Leistungen erstellen können, beträchtlich. Entsprechende Untersuchungen liegen aller-

1) New (1974).

dings erst in geringem Umfang vor. Bisher sind Datenerhebungen für Röntgenabteilungen¹⁾, Operationssäle²⁾, Physikalische Therapie, Kreislauf-Labor, Endoskopie, Nuklearmedizin³⁾, klinisch-chemisches Labor⁴⁾ sowie für die sehr spezifischen Tätigkeiten der Eingabe von Patientendaten über ein Sichtgerät in ein rechnergestütztes Aufnahmesystem⁵⁾ und die Eingabe von Leistungsverordnungen über Sichtgerät⁶⁾ bekannt. Diese Untersuchungen wurden an Krankenhäusern verschiedener Versorgungsstufen⁷⁾ durchgeführt. Sie erbrachten empirische Verteilungen, die Tests unterzogen wurden, um zu prüfen, ob sie durch die bekannten, analytischen Verteilungsfunktionen angenähert werden können.

Die Verwendung von analytischen Funktionen ist aus rechen-technischen Gründen (Speicherplatz, Rechenzeit) unbedingt der Verarbeitung empirischen Zahlenmaterials vorzuziehen. Will man sich sogar nur auf eine bestimmte Funktion stützen, sind folgende, nach ihrer Bedeutung geordnete Anforderungen zu stellen:

1. gute Approximation der empirischen Verteilungen
2. möglichst allgemeine Gültigkeit⁸⁾, d.h. Unabhängigkeit vom Krankentyp und von der Tätigkeitsart,
3. Möglichkeit die Parameter durch 2-Punkt- oder 3-Punkt-Schätzungen des Personals festzulegen,
4. leichte Verifizierungsmöglichkeiten (u.U. mit Wahrscheinlichkeitspapier),
5. möglichst günstige rechentechnische Handhabung,
6. Erklärungsmöglichkeit des Entstehens speziell dieser Verteilungsklasse.

1) Gierl (1975), Lutz (1975).

2) Denner (1976).

3) Lutz (1975).

4) Fichtner (1976).

5) Baron, Rising (1972).

6) Xarlis (1976).

7) Zum Begriff der Versorgungsstufe siehe Elsholz (1973), S. 56.

8) Die allgemeine Gültigkeit bezieht sich nur auf die Verteilungsklassen z.B. Binomialverteilung, nicht auf deren Parameter, in diesem Fall p .

Die oben erwähnten empirischen Untersuchungen haben ergeben, daß die Klasse der logarithmischen Normalverteilungen diesen Anforderungen in hinreichender Weise genügt.

Darüber hinaus ist die logarithmische Normalverteilung auch außerhalb des medizinischen Bereiches mit gutem Erfolg verwendet worden. So sind Wartungsarbeiten an Flugzeugen¹⁾ und Reparaturen an Personenkraftfahrzeugen²⁾ durch diese Verteilungsklasse approximiert worden.

Aitchison und Brown³⁾ berichten ferner von vielen Anwendungen im Bereich der Ökonomie, Sozialwissenschaften, Biologie und Physik.

2.3.2 Die logarithmische Normalverteilung

2.3.2.1 Definition

Die logarithmische Normalverteilung ist, wie folgt, definiert⁴⁾:

Die Zufallsvariable X heißt logarithmisch normalverteilt, wenn die Zufallsgröße $Y = \log X$ normalverteilt ist.

Y soll speziell $(\log f, \sigma)$ -normalverteilt sein, wobei gilt

Die Verteilungsfunktion hat dann folgende Gestalt:

$$(2.3.2.1 - 1) \quad F(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\log x} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{t - \log f}{\sigma}\right)^2\right) dt & x \\ 0 & x \end{cases}$$

Die Dichtefunktion lautet dementsprechend

1) Rehm (1973).

2) Rödter, Hueck (1975).

3) Aitchison, Brown (1969).

4) Heinhold, Gaede (1972), S. 139.

$$(2.3.2.1 - 2) \quad f(x) = \begin{cases} \frac{\log e}{2\pi\sigma x} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\log x - \log f}{\sigma}\right)^2\right) & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases}$$

Ein Beispiel für eine darartige Dichtefunktion mit $f = 10$, $\sigma = 0,2$ zeigt Abb. 2.3.2.1 - 1:

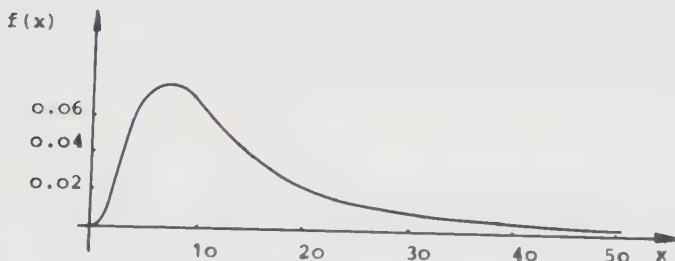


Abb. 2.3.2.1 - 1: Dichte einer logarithmischen Normalverteilung

Es ist zu beachten, daß f und σ nicht Erwartungswert und Standardabweichung der Zufallsvariablen X sind. Diese Parameter errechnen sich vielmehr zu

$$(2.3.2.1 - 3) \quad E(x) = \exp\left(\log_e f + \frac{\sigma^2}{2}\right)$$

$$(2.3.2.1 - 4) \quad \text{Var}(x) = \exp\left(2 \log_e f + 2\sigma^2\right) - \exp\left(2 \log_e f + \sigma^2\right)$$

für den Fall, daß die Basis e für den Logarithmus gewählt wurde¹⁾.

Die Wahl der Basis hat keine Bedeutung, da jeder Logarithmus zur Basis a in einen Logarithmus zur Basis b durch folgende Transformation umgewandelt werden kann:

$$\log_b N = M \log_a N \quad \text{mit } M = \frac{1}{\log_a b}$$

1) Golenko (1972), S. 69.

Wesentlich ist, daß die Beziehungen (2.3.2.1 - 1) und (2.3.2.1 - 2) bequeme Formeln insofern darstellen, als man mit der normalverteilten Zufallsvariablen Y rechnen wird und erst die Endergebnisse durch $Y = \log X$ wieder zu transformieren hat.

Die Umkehrung der Transformation $y = \log x$ der logarithmisch-normalverteilten Realisation x der Zufallsvariablen X in eine Normalverteilung verläuft, wie folgt:

In (2.3.2.1 - 2) ist y laut Definition $(\log f, G)$ -normalverteilt. D.h. $y = \log x$ wird durch

$$(2.3.2.1 - 5) \quad u = \frac{y - \log f}{G}$$

eine $(0,1)$ -Normalverteilung mit der Realisation u der Zufallsvariablen U . Löst man diese Beziehung nach x auf, ergibt sich

$$(2.3.2.1 - 6) \quad x = e^{G u + \log f}$$

Eine beliebige Fraktile $x_{p\%}$ wird somit durch Einsetzen der entsprechenden Fraktile $u_{p\%}$ der $(0,1)$ -Normalverteilung in (2.3.2.1 - 6) errechnet.

2.3.2.2 Schätzung der Parameter

Die Parameter $\log f$ und G der Beziehungen (2.3.2.1 - 1) und (2.3.2.1 - 2) können auf mehrere Arten ermittelt werden.

Liegt ein bestimmter Umfang einer Stichprobe der Zufallsvariablen X vor, so können sie numerisch, wie folgt, bestimmt werden:

$$(2.3.2.2 - 1) \quad \log f = \frac{\sum_{i=1}^n h_i \log x_i}{n}$$

$$(2.3.2.2 - 2) \quad G = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n h_i (\log x_i)^2 - (\sum_{i=1}^n h_i \log x_i)^2 / n}{n - 1}}$$

Dabei ist n der Stichprobenumfang, h_i die relative Häufigkeit der Realisation x_i der Zufallsvariablen X .

Es sind dies die bekannten Schätzfunktionen für Erwartungswert und Standardabweichung von Zufallsvariablen. Hier wurde nur die Transformation $\log x$ eingeführt. Graphisch sind die Parameter mit Hilfe eines Wahrscheinlichkeitspapiertes mit logarithmisch unterteilter Merkmalsachse zu ermitteln.¹⁾

Die Stichprobenpunkte einer logarithmisch verteilten Zufallsvariablen müssen dann annähernd auf einer Geraden liegen.

Dabei ist

$$(2.3.2.2 - 3) \quad \log f = \log x_{50\%}$$

$$(2.3.2.2 - 4) \quad G = \log x_{84,1\%} - \log x_{50\%}$$

Man entnimmt die 50% Fraktile von x direkt aus der Kurve. Die 84,1% Fraktile wird in (2.3.2.2 - 4) eingesetzt und liefert G .

Eine dritte Möglichkeit besteht darin, sich mit einer Schätzung der minimalen und maximalen Realisation einer Zufallsvariablen zufrieden zu geben. Dieses Verfahren wird in der Netzplantechnik, z.B. beim Bau großer Projekte, verwendet.²⁾

Die Schätzung wäre von Spezialisten vorzunehmen, die die entsprechende Tätigkeit schon oft miterlebt bzw. selbst ausgeführt haben. Im Falle des Krankenhauses sind dies Ärzte, Schwestern, medizinisch-technische Assistentinnen und Pfleger. Daß sich die Fehlerquote der Schätzungen durchaus in akzeptablen Grenzen hält, legt eine Untersuchung von Robinson³⁾ u.a. nahe, in der über Schätzgenauigkeit von Ärzten bezüglich der Verweildauer berichtet wird.

1) Heinhold, Gaede (1972), S. 117.

2) Golenko (1972), S. 69; Meyer, Hansen, Rohde (1973), S. 131.

3) Robinson, u.a. (1966).

Es ist damit notwendig einen funktionalen Zusammenhang zwischen der minimalen Realisation t_1 und der maximalen Realisation t_2 einer logarithmisch-normalverteilten Zufallsvariablen und ihren Parametern $\log f$ und G zu gewinnen. Analysen in der Bauwirtschaft haben ergeben, daß folgende Beziehungen gelten.¹⁾

$$(2.3.2.2 - 5) \quad \log f = \log (t_2 - t_1) - 1 \quad t_2 - t_1 \geq 1$$

$$(2.3.2.2 - 6) \quad G = 0,5$$

Es ist nun zu prüfen, ob die Formeln (2.3.2.2 - 5) und (2.3.2.2 - 6) auch für medizinische Tätigkeiten gelten.

2.3.2.3 Ergebnisse empirischer Untersuchungen in zwei Krankenhäusern

Untersuchungen verschiedenster medizinischer Tätigkeiten z.B. Thorax Röntgenaufnahmen, Befundung von Röntgenaufnahmen, verschiedene Operationen haben erwiesen, daß fast alle der untersuchten Dauern medizinischer Tätigkeiten der logarithmischen Normalverteilung gehorchten.²⁾

Abb. 2.3.2.3 - 1 zeigt als Beispiel die empirische Verteilung der Dauer von Strumaresektionen (Histogramm), die durch eine logarithmische Normalverteilung (glatte Kurve) angenähert wurde. Die Verteilung wurde einem χ^2 -Test unterzogen. Dabei ergab sich eine errechnete Sicherheitswahrscheinlichkeit von 46 %, d.h. empirische und vermutete Verteilung weichen nicht erheblich voneinander ab.³⁾

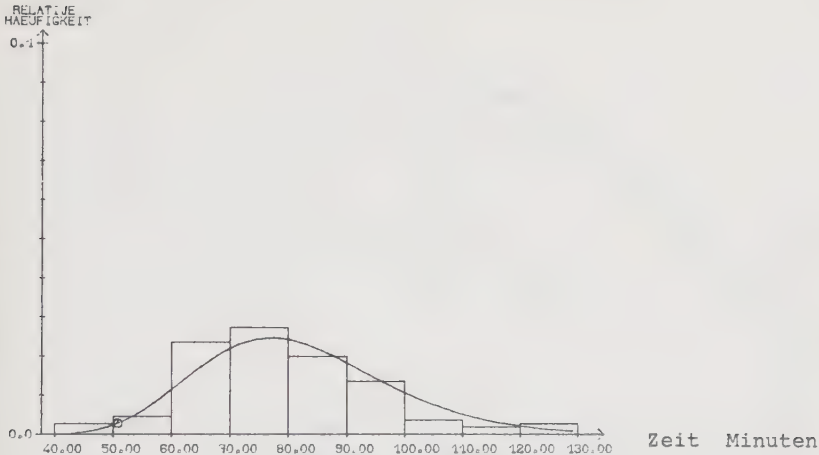
Ähnliche Ergebnisse stellten sich bei anderen Operationsdauern, bei Röntgendauern⁴⁾, sowie vielen Tätigkeitsdauern in weiteren Leistungsstellen ein.

1) Golenko (1972), S. 69.

2) Denner (1976); Lutz (1975); Abschnitt 3.2.

3) Das Testprogramm wurde von Herrn Dipl.-Kfm. W. Schläger zur Verfügung gestellt.

4) Die Ergebnisse für eine Röntgenabteilung werden in Abschnitt 3.2 vorgestellt.



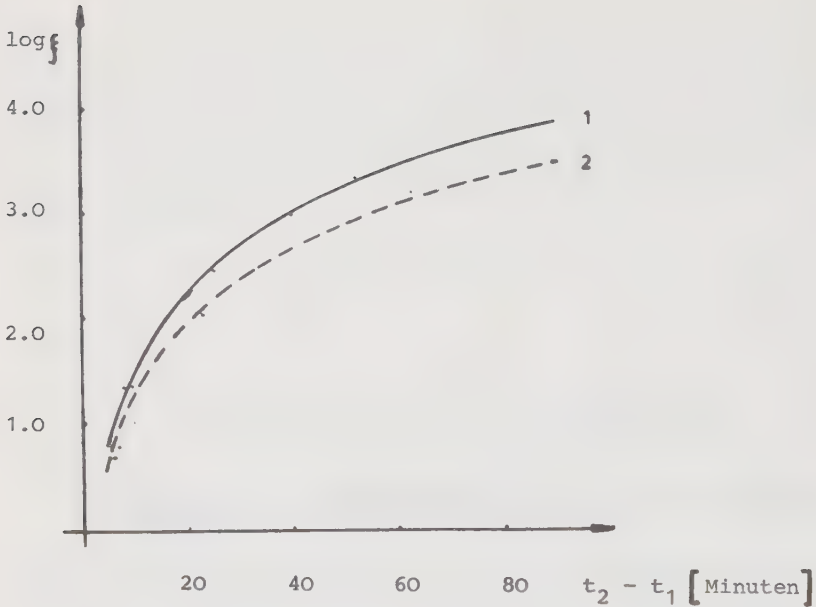
2.3.2.3 - 1: Dichte der Dauer von Strumaresektionen

Dies legt den Schluß nahe, bei zukünftigen Untersuchungen von der Tatsache auszugehen, daß die logarithmische Normalverteilung eine typische Verteilung der Dauer medizinischer Tätigkeiten ist. Darüber hinaus hat eine Analyse ergeben, daß die Beziehungen (2.3.2.2 - 5) und (2.3.2.2 - 6) zur Parameter-Schätzung annähernd auch für diese Art von Tätigkeiten im Krankenhaus gültig sind.

In Abb. 2.3.2.3 - 2 sind $\log f$ und $\Delta t = t_2 - t_1$ einer Reihe unterschiedlicher Tätigkeiten aufgetragen. Eine Regressionsanalyse liefert für diese Stichprobe

$$(2.3.2.3 - 1) \quad \log f = 1.0577 \log \Delta t - 0.8895 \quad \Delta t \geq 1$$

Der Test des Regressionskoeffizienten auf den Wert 1.0 ergab, daß keine signifikante Abweichung vorlag, d.h., daß die Formel (2.3.2.2 - 5) auch für die untersuchten, medizinischen Tätigkeiten angewendet werden kann.



2.3.2.3 - 2: Regressionsfunktion für $\log \xi$ und $t_2 - t_1$

Kurve 1 stellt Gleichung (2.3.2.3 - 1), Kurve 2 Gleichung (2.3.2.2 - 5) dar.

Ein etwas anderes Bild ergibt sich bei der Überprüfung der Beziehung für σ .

Die in Abb. 2.3.2.3 - 3 dargestellte Punktwolke von Wertepaaren Δt und σ legt den Versuch nahe, eine Exponentialfunktion anzusetzen.

$$(2.3.2.3 - 2) \quad \sigma = \alpha \cdot \exp (-\beta \Delta t)$$

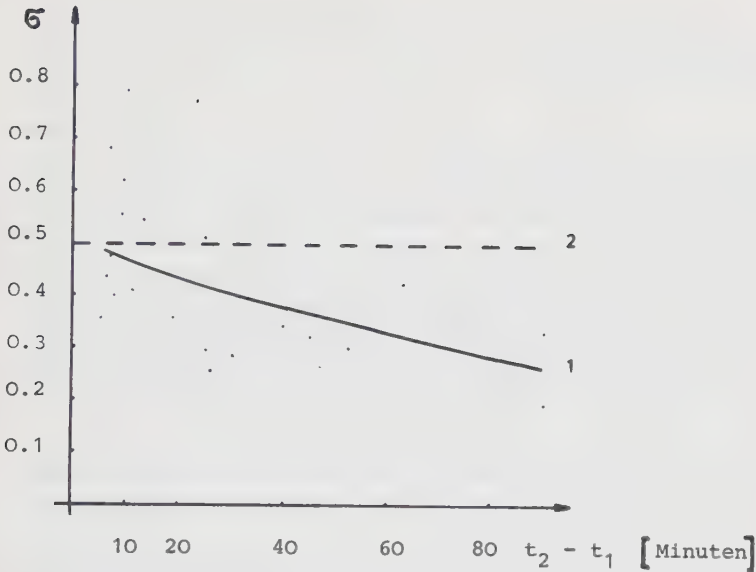


Abb. 2.3.2.3 - 3: Regressionsfunktion von G und $t_2 - t_1$

Die Regressionsanalyse zeigt, daß abweichend von Golenko mit der Gleichung

$$(2.3.2.3 - 3) \quad G = 0.5122 \exp (- 0.00746 \Delta t)$$

gerechnet werden müßte. In der Abb. 2.3.2.3 - 3 sind wieder Beziehung (2.3.2.3 - 3) Kurve 1 und Beziehung (2.3.2.2 - 6) Kurve 2 aufgetragen.

Die Abweichung der Formel (2.3.2.3 - 3) von (2.3.2.2 - 6) ist signifikant, wie ein Test ergab. Will man also mit hinreichender Genauigkeit arbeiten, ist es angebracht, für die 2-Punkt-Schätzung von G die ermittelte Beziehung (2.3.2.3 -3) zu verwenden.

2.4 Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Material- und Medikamentenverbrauch

Ebenso wie die Tätigkeitsdauern sind Material- und Medikamentenverbräuche Zufallsvariable.

Daher müssen auch in diesem Bereich umfangreiche statistische Erhebungen durchgeführt werden, um das für die Ablaufplanung notwendige Datenmaterial zu gewinnen.

Als Zufallsverteilungen dieser Verbräuche sind für den Fall des Verbrauches von Isotopen zur Funktionsdiagnose in einer kleinen Nuklearabteilung Normalverteilungen ermittelt worden.¹⁾

Als Beispiel ist in Abb. 4.5 - 1 eine solche Verteilung zu sehen. Es handelt sich hier um eine links gestutzte Normalverteilung.

Liegen keinerlei Daten vor, kann auf logarithmische Normalverteilungen zurückgegriffen werden, deren Parameter wieder durch 2-Punkt-Schätzungen des Personals bestimmt werden.

relative
Häufigkeit

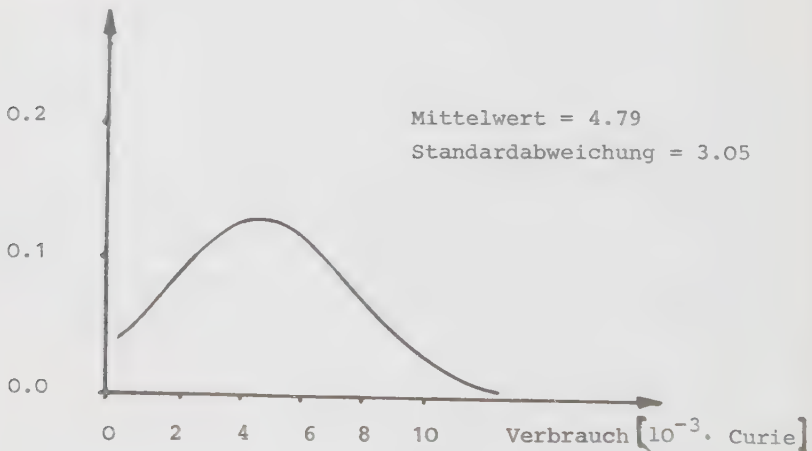


Abb. 4.5 - 1: Verbrauch an Technetium 99m an Dienstagen

1) Bernau (1976).

2.5 Die Leistung als Kombination von Leistungselementen.

2.5.1 Definition der Leistung

Unter einer Leistung soll im folgenden eine derartige Ausführung eines oder mehrerer Arbeitselemente in einer vorgegebenen Reihenfolge und (im allgemeinen) einer bestimmten, zeitlichen Begrenzung verstanden werden, so daß damit eine definierte, medizinische Anforderung oder Verordnung erfüllt wird. Als Beispiel möge eine Röntgenuntersuchung des Magen-Darm-Traktes dienen. Sie setzt sich aus mehreren, einzelnen Leistungselementen wie Sortieren, Röntgen, Befunden usw. zusammen.¹⁾ Diese Leistungselemente werden nicht unmittelbar hintereinander und sogar nicht einmal am selben Tag ausgeführt. Insgesamt stellen sie die Erfüllung einer vom Stationsarzt ausgestellten, diagnostischen Anforderung dar. Die Namen der Leistungen sind die Kommunikationsbasis des Personals bezüglich medizinischer Tätigkeiten. Sie erscheinen in den Leistungsbüchern der Leistungsstellen, die eine der wenigen Quellen für Datenmaterial im Krankenhaus sind. Auch die Krankenhausträgerorganisationen und die Krankenkassen stützen sich bei ihren Verhandlungen über Änderungen des Pflegesatzes auf die vermutete Kostenentwicklung der Leistungen.

2.5.2 Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Leistungsanforderungen

Auch die Zahl der Anforderungen pro Periode, d.h. die Zahl der von den Stationsärzten verordneten Leistungen, ist als Zufallsvariable aufzufassen.

Bei der Analyse des Anforderungsanfalls sind zwei Betrachtungsweise zu unterscheiden. Einerseits kann man nach der Zahl der Anforderungen pro Periode fragen, ohne den Ankunftsprozeß dieser Anforderungen zu berücksichtigen. Diese Fragestellung läuft darauf hinaus, Realisationen zu messen. Hierbei haben sich oftmals Normalverteilungen²⁾ eingestellt. Andererseits kann auch der zeitliche Verlauf des Ankunfts-

1) Näheres dazu wird in Abschnitt 3 ausgeführt.

2) Vgl. etwa Bernau (1976), S. 16 ff.

prozesses selbst von Interesse sein. Das kommt vor allem bei Warteschlangenmodellen in Betracht. Im einfachsten Fall erhält man hier Poissonverteilungen¹⁾ für die Zahl der Anforderungen.

1) Vgl. etwa Schreiber (1975), S. 28 ff.

3. LEISTUNGSSTELLEN

3.1 Definition der Leistungsstelle

Unter einer Leistungsstelle soll ein Teilbereich eines Krankenhauses verstanden werden, der erforderlich ist, um eine oder mehrere spezifische Leistungen zu erbringen. Damit werden gleichartige Arbeitsgänge zu einer Organisationseinheit zusammengefaßt z.B. sämtliche Operationen in der Leistungsstelle Operationsabteilung.¹⁾ Es ist natürlich auch möglich, Leistungsstellen nach weiteren Gesichtspunkten zu gliedern.

Beispielsweise können gleiche Funktionen dezentral angeordnet werden, falls dies zweckmäßig erscheint.

In einer Leistungsstelle können auch mehrere Geräte und Einrichtungen mit gleichen Funktionen aufgestellt sein, die vom Personal benutzt werden. Diese Funktionskomplexe sollen als Bedienstungsstationen bezeichnet werden. Jede Bedienstungsstation kann hierbei selbständig eine oder mehrere Leistungen des in der Leistungsstelle möglichen Spektrums an Tätigkeiten ausführen.

Dazu gehört beispielsweise ein Röntgenraum.

Außerdem ist der Begriff der Leistungsstelle identisch mit dem Begriff der Kostenstelle in der Kostenrechnung im Krankenhaus.

Die oben definierten Teilbereiche des Krankenhauses sind demnach auch die Einheiten, auf denen das Rechnungswesen nach der Bundespflegesatzverordnung basieren soll.²⁾

3.2 Ablaufplanung für eine Leistungsstelle am Beispiel der Röntgenabteilung der Medizinischen Klinik der Universität Erlangen-Nürnberg

Im folgenden soll an Hand eines Beispiels ausführlich ein Modell der Ablaufplanung für eine Leistungsstelle beschrieben

1) Vgl. hierzu Eichhorn I (1974), S. 312.

2) Vgl. hierzu Elsholz (1973), S. 114

ben werden.

Die isolierte Betrachtungsweise einer Leistungsstelle ohne Berücksichtigung der komplexen Einwirkungen der Leistungsstellen aufeinander ist zweifellos problematisch.

Es werden im nachstehenden Modell lediglich die Einwirkungen der Stationen berücksichtigt. Dennoch ist ein Einzelmodell dann sinnvoll, wenn es sich vornehmlich mit dem internen Ablauf befaßt, in der Absicht, diesen günstig zu gestalten und die wechselseitigen Einwirkungen der relevanten Leistungsstellen durch Variation der Eingabeparameter erfaßt. Beispielsweise werden unten die Auswirkungen einer Erhöhung der Anforderungen, d.h. aggregierte Auswirkungen von Änderungen auf Stationen bzw. anderen Leistungsstellen untersucht.

Zunächst sollen jedoch Arbeiten, die andere Leistungsstellen behandeln, kurz vorgestellt werden.

Zu den wichtigsten Leistungsstellen des Krankenhauses gehören die Operationssäle. In der englischsprachigen Literatur sind einige Anwendungsfälle für die Ablaufplanung in den Operationssälen zu finden.

Da die Verflechtung der Arbeitsabläufe im Operationssaal mit den Stationen relativ kompliziert ist, werden vor allem Simulationstechniken angewendet, um Abläufe zu analysieren und zu optimieren.

Das Simulationsmodell von Schmitz und Kwak¹⁾ soll die Frage nach der zeitlichen und räumlichen Kapazität von Operationsabteilungen beantworten, sowie Aussagen über die Konsequenzen des Anwachsens der Bettenkapazität auf die Operationsabteilung liefern.

Goldman u.a.²⁾, sowie Fetter und Thompson³⁾ verwenden ebenfalls Simulationsmodelle, um Prioritätsregeln für die Patientenreihenfolgen vor Operationssälen zu vergleichen.

Fetter und Thompson untersuchen für die FCFS-Regel hauptsächlich die Auswirkungen verschiedener Operationssaal-Konfigu-

1) Schmitz, Kwak (1972).

2) Goldman u.a. (1969).

3) Fetter, Thompson (1965).

rationen auf deren Auslastung. Goldman u.a. beschäftigen sich mit einfachen Prioritätsregeln FCFS, LOT und SOT und vergleichen sie mit Hilfe von Kenngrößen wie Auslastung, mittlere Warteschlangenlänge usw. Es stellt sich heraus, daß die LOT-Regel bezüglich Durchlaufzeit und Leerzeit die besten Ergebnisse aufweist. Dagegen schneidet sie bezüglich der Patientenwarteschlangenlänge weniger gut ab.¹⁾

Whitston²⁾ analysiert die Operationssaalbelegung mit Hilfe eines Modells, das die bekannten Formeln der Warteschlangentheorie für Wartesysteme vom Typ (M/M/m) im eingeschwungenen Zustand verwendet.

Hier ist jedoch zu bemerken, daß damit von negativ-exponential-verteilten Operationsdauern ausgegangen wird. Dies ist eine Annahme, die, wie schon erwähnt, in der Literatur nirgends eine Stütze findet.

Einen Algorithmus zur Einplanung von Operationen unter Verwendung der Kriterien Asepsis und Art des Operationssaals verwendet Denner.³⁾ Er stützt sich hierbei auf empirisch ermittelte Verteilungen von Operationsdauern, die durch Fal- tungsoperationen zur jeweiligen Operationsgesamtdauer verknüpft werden. Zur Darstellung der Ergebnisse in Reihenfolge- und Terminplänen für Stationen und Operationssäle werden bestimmte Fraktilen der Gesamtdauer angegeben.

Eine ähnlich komplexe Struktur wie eine Röntgenabteilung weist das klinisch-chemische Labor eines Krankenhauses auf.

Ein Modell, das diese Leistungsstelle abbildet, wird daher ebenfalls auf ein Simulationsverfahren zurückgreifen.

1) Die LOT-Regel erbrachte im Fall der Röntgenabteilung eher entgegengesetzte Ergebnisse, was die These von Dörken (Dörken (1973), S. 120) stützt, daß allgemein verbindliche Aussagen über die Güte von bestimmten Prioritätsregeln nicht möglich sind.

2) Whitston (1965).

3) Denner (1976).

Hier geht es darum Entscheidungsunterlagen für Investitionsvorhaben (Mehrkanal-, Einkanalautomaten) und Abarbeitungsstrategien für die ankommenden Proben aufzufinden.

Den Aufbau eines derartigen Simulationsmodells¹⁾ zeigt Abb. 3.2 - 1. Dabei besteht eine Anforderung aus dem Patientenspecimen und einer Liste der gewünschten Verfahren. (Unter Verfahren ist die Gewinnung eines chemischen Wertes zu verstehen). Die Verteiler teilen das Probengut den entsprechenden Geräten zu. Bestimmte Vorarbeiten wie Zentrifugieren gehen voraus. Die Proben werden dann in die Warteschlangen vor den Geräten eingereiht. Nach der Abarbeitung prüfen Kontrollen, ob der gewünschte medizinische Standard der Ergebnismerte eingehalten worden ist.

Die gestrichelten Linien deuten Wiederholungen und Geräteausfälle an. Durch programmtechnisch realisierte Schalter können unterschiedliche Gerätekombinationen simuliert werden. In der Abb. 3.4 - 1 ist die jeweils maximale Zahl der Geräte dargestellt. Eine detaillierte Darstellung des Modells ist bei Fichtner²⁾ zu finden.

Man kann auch das Lagerhaltungsproblem im Krankenhaus, das die rechtzeitige Bereitstellung von Verbrauchsmaterial zu minimalen Kosten bedeutet, als Ablaufplanungsaufgabe interpretieren. Dieses Problem bringt im Krankenhaus einige, spezifische Schwierigkeiten mit sich.

Zunächst ist der Bedarf grundsätzlich als stochastisch anzusehen.³⁾ Fehlmengen sind aufgrund medizinischer Forderungen

1) Dieses Modell stellt im wesentlichen das geplante, zentrale Labor der Kliniken der Universität Erlangen-Nürnberg dar. Modellbildung und Programmierung entstanden in einem gemeinsamen Projekt der Lehrstühle Informatik 4 und Unternehmensforschung der Universität Erlangen-Nürnberg.

2) Fichtner (1976).

3) Vgl. etwa Adam, Berry, Whybark (1972); Bernau (1976), S. 8 ff; Kolisek (1973), S. 9.

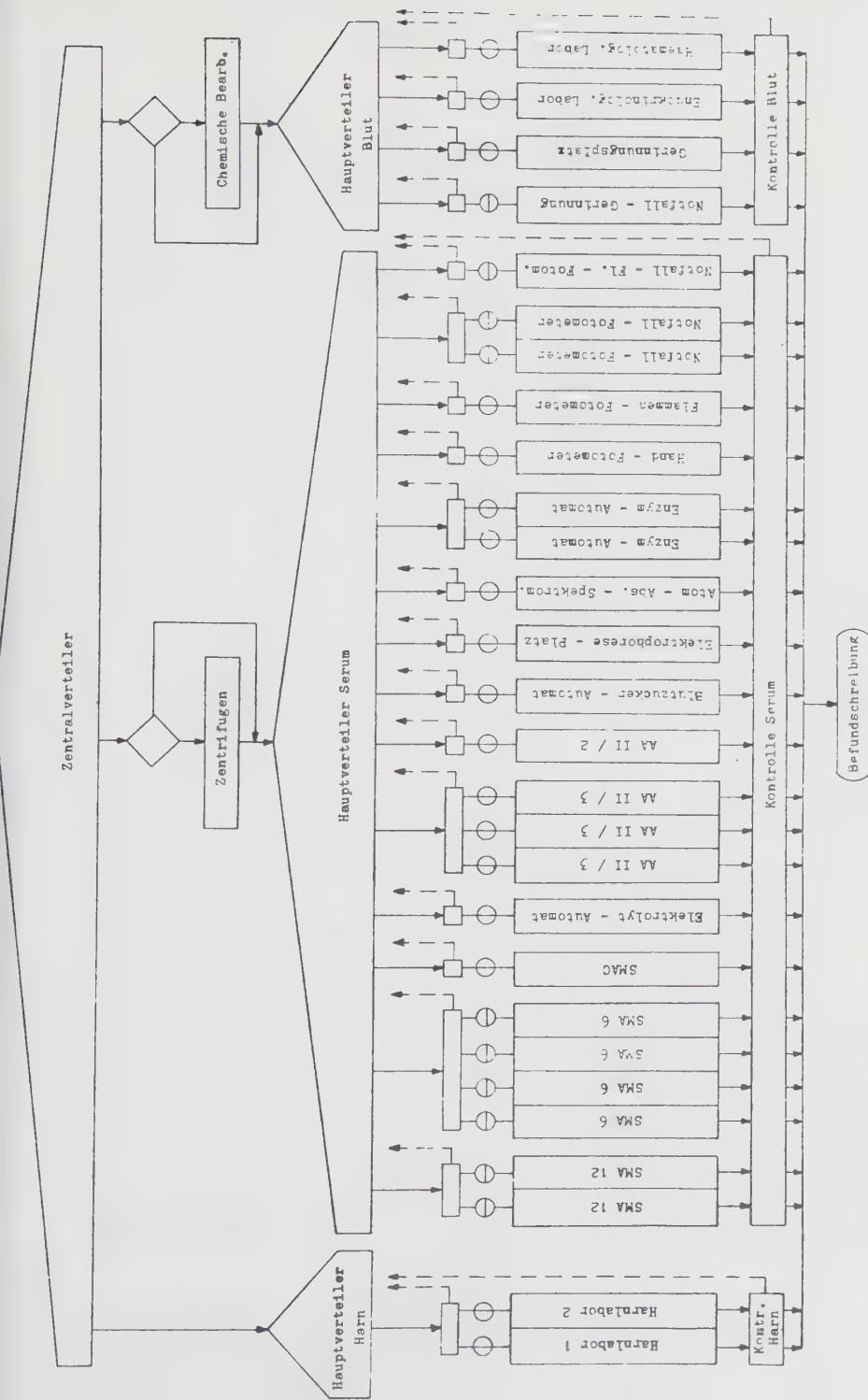


Abb. 3.2 - 1: Modell eines klinisch-chemischen Labors

bei den meisten Gütern nicht zugelassen. Genauer bedeutet dies, daß Fehlmengen nur mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit auftreten dürfen. Dies hat jedoch eine hohe Kapitalbindung zur Folge.

Schließlich sind viele Güter (Blutkonserven, Medikamente) nicht unbegrenzt lagerfähig. Es sind dem Verbrauch damit enge, zeitliche Grenzen gesetzt.

Als Lösungsansatz wird im einfachsten Fall die Bestimmung der optimalen Losgröße nach der bekannten Losgrößen-Formel¹⁾ für deterministischen Bedarf, unendlicher Produktionsgeschwindigkeit, konstanter Nachfragerate und einer Lieferzeit von Null vorgeschlagen.²⁾ Obwohl dieses Modell die Wirklichkeit nur sehr vergrößert wiedergibt, soll damit in einem Krankenhaus für die in die Planung einbezogenen Güter eine Kostenersparnis von 12 % gegenüber der "Planung durch Erfahrung" erreicht worden sein.

Für den Bedarf in einem klinischen Labor entwickelt Kolisek³⁾ ein spezielles, stochastisches Lagerhaltungsmodell.

Insbesondere für den Ablauf in chirurgischen Kliniken (Ausgleich des Blutverlustes bei Operationen bzw. nach Unfällen) ist die Bevorratung von Blutkonserven von großer Bedeutung.

Es handelt sich hierbei um ein nicht-triviales Lagerhaltungsproblem, da man es mit stochastischen Liefermengen (Blutspender), stochastischem Bedarf, teils austauschbaren, teils nicht austauschbaren Blutgruppen und vor allem mit leicht verderblichen Gütern zu tun hat. In der Regel ist nur eine

1) Vgl. etwa Meyer, Hansen, Klausmann (1975), S. 30.

2) Türks (1974).

3) Kolisek (1973).

Blutbank für einen Klinikkomplex eingerichtet.

In der englisch sprachigen Literatur sind einige Arbeiten zu finden, die sich mit der Analyse von Blutbanken und der Ermittlung optimaler Bestellstrategien beschäftigen.¹⁾

Beispielsweise stützt sich das Modell von Brodheim, Derman und Prastocos auf eine Interpretation des Prozesses von Blutkonservenzugängen und -abgängen als Markovkette. Dabei stellt die Zufallsvariable "Zahl der Blutkonserven zu einem bestimmten Zeitpunkt" einen Zustand des diskreten Zustandsraumes der Markovkette dar. Mit diesem Ansatz können verschiedene Bestellstrategien und Abgabestrategien untersucht werden.

Ein ähnliches Problem wie im Fall der Blutkonserven stellt sich für die Bevorratung von Radionukliden in einer nuklearmedizinischen Abteilung. Diese radioaktiven Präparate dienen zur Funktionsdiagnostik und Therapie innerer Organe.

Sie erleiden durch den radioaktiven Zerfall einen Massenverlust. Zuviel bestellte Mengen von Nukliden führen zu einem zu erhöhter Kapitalbindung, zum anderen zu einer höheren Menge nicht verwendungsfähigen Nuklidmaterials.

Eine rechnergestützte Bestandsführung²⁾ stellt einen guten Ausgangspunkt für einen Lösungsvorschlag dieses Lagerhaltungsproblems dar.

Die Bestandsführung hält jedoch lediglich die Lagerdaten auf dem neuesten Stand. Die Bestellentscheidung trifft der Benutzer.

Einen Schritt weiter geht die automatische Bestellentscheidung bei festen Bestellgrößen (z.B. fester Losgröße, fester

1) Brodheim, Derman, Prastocos (1975); Duncan (1973); Frankfurter (1974); Jennings (1973).

2) Ein Vorschlag für eine derartige Nuklid-Bestandsführung ist bei Ammende (1972) zu finden.

Lieferzeit).¹⁾ Hierzu ist, da man es mit einem stochastischen Verbrauch zu tun hat, eine Prognose des zukünftigen Verbrauchs notwendig.²⁾ Die Prognose bezieht sich im Falle des von Bernau geschilderten Krankenhauses Kulmbach nur auf den jeweils auf den Prognosezeitpunkt folgenden Tag, weil die Lieferzeit etwa 24 Stunden beträgt. Der Masseschwund der Nuklide gehorcht einer deterministischen, negativen Exponentialfunktion.³⁾ Der gesamte, tägliche Verbrauch wird zu einem Zeitpunkt dem Lager entnommen.

Um eine Berechnungsgrundlage für den Masseschwund zu erhalten, muß ein Zeitpunkt angegeben sein, zu dem eine bestimmte Ausgangsaktivität vorhanden war. Dies wird durch das Kalibrierungsdatum angegeben. Zu diesem Zeitpunkt ist die bestellte Losgröße auf einem Aktivitätsniveau von 100 %.

Die Bestellung einer festen Losgröße eines Nuklides wird dann ausgelöst, wenn der prognostizierte Gesamtverbrauch für den nächsten Tag größer ist, als die noch vorhandene, verwertbare Nuklidaktivität.

Optimale Bestellstrategien werden in einem Simulationsmodell für ein Nuklidlagerhaltungssystem von Bernau, Gierl und Schläger⁵⁾ entwickelt.

1) Bernau (1976).

2) Vgl. hierzu Bernau, a.a.O., S. 21 ff.

3) Die deterministische Eigenschaft des radioaktiven Zerfalls bezieht sich allerdings nur auf die makrophysikalische Betrachtung des Zerfallsprozesses. Mikrophysikalisch, d.h. auf der Ebene der Atome beobachtet man jedoch einen stochastischen Prozeß. (Vgl. etwa Gerthsen, Kneser (1971), S. 467). Der Masseverlust wird durch die Halbwertszeit des Nuklides bestimmt. Die Halbwertszeit ist für die einzelnen Nuklide unterschiedlich (Gerthsen, Kneser, a.a.O., S. 469).

4) Statt die Menge des radioaktiven Stoffes, der zumeist im flüssigen Aggregatzustand vorliegt, durch ein Gewichtsmaß anzugeben, verwendet man die Intensität (Aktivität) des radioaktiven Zerfalls als Maß mit der Dimension Curie (Ci). Im Verlaufe der medizinischen Untersuchung wird nämlich gerade das Verhalten des Körpers auf eine bestimmte Eingangsaktivität beobachtet, da ja nur Stärke und Lokalisation des radioaktiven Zerfalls außerhalb des Körpers gemessen werden kann.

5) Bernau, Gierl, Schläger (1976).

Auch für die Leistungsstelle Bettenstation sind OR-Modelle entwickelt worden. Das Interesse liegt aber hier bisher ausschließlich auf Personal- bzw. Bettenkapazitätsfragen. Es seien hierfür zwei Beispiele angeführt. Der Aspekt der Ablaufplanung wird dabei nicht unmittelbar berücksichtigt. Warner und Prawda¹⁾ planen die Zahl der Schwestern pro Bettenstation je Periode mit Hilfe eines gemischt ganzzahligen, quadratischen Ansatzes der mathematischen Programmierung.

Beenhakker²⁾ schätzt die Zahl der Betten pro Station unter Verwendung einer multiplen Repressionsfunktion. Dazu verwendet er 117 Einflußfaktoren, die letztlich die Bettenzahl bestimmen.

3.2.1 Problemstellung

Die vorliegende Untersuchung befaßt sich mit dem Arbeitsablauf in der Röntgenabteilung der Medizinischen Klinik der Universität Erlangen-Nürnberg.

Die Röntgenabteilung gehört zu den wichtigsten diagnostischen Einrichtungen eines Krankenhauses, insbesondere eines Spezialkrankenhauses mit Lehr- und Forschungsaufgaben.

Die Röntgenabteilung ist ein wichtiges Instrument des Stationsarztes zur diagnostischen Abklärung eines Krankheitsbildes. Der reibungslose Ablauf innerhalb der Abteilung, sowie eine rasche Informationsrückleitung an die Stationen, ist daher eine wesentliche Forderung für den effizienten Gesamtablauf eines Krankenhauses.

1) Warner, Prawda (1972).

2) Beenhakker (1963).

Da die Patienten aber auch in anderen Leistungsstellen des Krankenhauses untersucht bzw. behandelt werden, hat der Ablauf in der Röntgenabteilung auch Auswirkungen auf den Arbeitsablauf der betreffenden Leistungsstellen sowie auf das Krankenhaus insgesamt.

Es bestand von seiten der Klinik das Interesse, die Röntgenabteilung bezüglich des Arbeitsablaufs zu analysieren und die Kapazitätsauslastung der Röntgenabteilung für den gegenwärtigen und zukünftigen Anforderungsanfall zu bestimmen. Ferner war zu untersuchen, inwieweit Änderungen im Arbeitsablauf zu günstigeren Ergebnissen, d.h. z.B. größerem Patientendurchsatz und schnellerem Befundrücklauf führen.

3.2.2 Struktur- und Ablaufanalyse der Röntgenabteilung

3.2.2.1 Erzeugung von Röntgenstrahlen und Röntgenaufnahmen

3.2.2.1.1 Technik

Röntgenstrahlen entstehen beim Aufprall beschleunigter Elektronen auf einen festen Körper. Die dabei auftretende elektromagnetische Strahlung liegt in einem Frequenzband von ca. 10^{19} Hz bis 10^{21} Hz. Die Energie, mit der die Elektronen auftreffen, bestimmt die Breite dieses kontinuierlichen Frequenzbandes. Bei höheren Energien treten höhere Frequenzen auf.

Zur Erzeugung von Röntgenstrahlen werden Elektronen in einem evakuierten Gefäß, der Röntgenröhre, aus einer erhitzten Kathode freigesetzt und in einem elektrischen Feld auf eine Metallanode hin beschleunigt. Die Beschleunigungsspannung bestimmt die Bewegungsenergie der Elektronen und damit das Frequenzband.

3.2.2.1.2 Strahlenschutz

Strahlen hoher Frequenzen werden vom menschlichen Körper weniger stark absorbiert als Strahlen niedriger Frequenzen.

Man spricht in diesem Zusammenhang von mehr oder weniger größerer "Härte" der Röntgenstrahlen. Strahlen können Schädigungen der Haut, der Organe des Körpers und der menschlichen Gene zur Folge haben.

Um die "Menge" der Strahlung, die z.B. ein Patient bzw. das Personal während einer Röntgenuntersuchung aufnimmt, angeben zu können, definiert man als Maß für die physikalische Wirkung der Strahlung die "Dosis". Man unterscheidet Energiedosis und Ionendosis. Die Energiedosis ist ein Maß für die einem Masseelement durch Strahlung übertragene Energie. Ihre Einheit ist Rad [rd]. Die Ionendosis ist ein Maß für die in einer definierten Luftmenge unter Einwirkung der Strahlung erzeugte Anzahl von Ionen. Ihre Einheit ist Röntgen [R]. Die Einheiten gelten auch für andere Strahlen, z.B. Alpha-Strahlen.

Will man die biologische Wirkung von Strahlen noch berücksichtigen, multipliziert man die Energiedosis mit einem je nach Strahlentyp unterschiedlichen Faktor q.

Alpha-Teilchen und schnelle Elektronen rufen stärkere biologische Wirkungen als Röntgenstrahlen hervor. Für Röntgenstrahlen speziell gilt $q = 1$. Diese Dosis nennt man Äquivalentdosis.

Die Einheit ist REM.

$$(3.2.2.1.2 - 1) \quad \text{Äquivalentdosis [REM]} = q \cdot \text{Energiedosis [rd]}$$

Da bei Röntgenstrahlen gilt $1 \text{ RAD} = 1 \text{ Röntgen}$ ergibt sich

$$(3.2.2.1.2 - 2) \quad \text{Äquivalentdosis [REM]} = \text{Ionendosis [R]}$$

Die Ionendosis kann leicht mit sogenannten Dosimetern, die die Ionisation der Luft im Röntgenstrahl zwischen Röntgenröhren und Patient messen, bestimmt werden.

Sämtliche Institutionen, die mit der Anwendung von Röntgenstrahlen befaßt sind, haben den notwendigen Strahlenschutz auf der Grundlage der "Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen" (Röntgenverordnung), im folgenden kurz RÖV¹⁾, zu organisieren.

1) Röntgenverordnung (1973).

Das Personal muß durch Bleischürze, Abschirmungen u.a.m. geschützt werden. Durch RÖV § 13 wird die Messung der Dosisleistung zur Auflage gemacht. In § 29 wird konkretisiert, welche physikalischen Größen schriftlich festzuhalten sind. Dies sind insbesondere:

- Größe der Strahlenbelastung
- Zahl der Aufnahmen
- Durchleuchtungsdauer
- Oberflächendosis
- Abgrenzung und Lokalisation des Bestrahlungsfeldes
- Röhrenstromstärke
- Röhrenspannung
- ✓ Brennfleckhautabstand

In § 32 Absatz 2 bis 6 wird festgelegt, welche Dosis innerhalb bestimmter Zeitintervalle eine beruflich strahlenexponierte Person aufnehmen darf.

Eine allgemeine obere Schranke ergibt sich nach § 13 Abs. 2 als höchstzulässige Lebensalterdosis. Bezeichnet man mit HL die höchstzulässige Lebensalterdosis, mit LA das Lebensalter einer strahlenexponierten Person, so muß die Beziehung

$$(3.2.2.1.2 - 3) \quad HL = 5 (LA-18) \quad [REM]$$

eingehalten werden. Die graphische Darstellung der Beziehung (3.2.2.1.2 - 3) ist in Abb. 3.2.2.1.2 - 1 zu sehen.

Absatz 3, 4 und 5 legen die Höchstdosis für jeden 13 aufeinanderfolgende Wochen umfassenden Zeitintervall fest. Sie beträgt bei Männern 3 REM, bei Frauen 1,5 REM. Einen möglichen Verlauf der Dosis bei einer MTA über mehrere 13-Wochen-Zyklen zeigt Abb. 3.2.2.1.2 - 2.

Absatz 6 läßt eine einmalige außergewöhnliche Überdosis im Arbeitsleben einer strahlenexponierten Person zu, die nicht auf die höchstzulässige Lebensalterdosis angerechnet wird.

Im Falle der untersuchten Röntgendiagnostikabteilung stellte sich heraus, daß in allen Fällen die 13-Wochen-Dosis mindestens um den Faktor 10^{-1} unterhalb der gesetzlich vorgeschriebenen Höchstgrenzen lag.

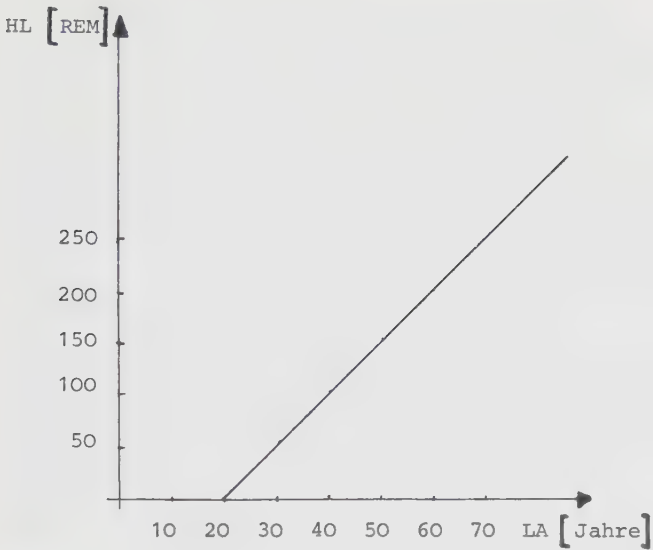


Abb. 3.2.2.1.2 - 1: Zeitlicher Verlauf der höchstzulässigen Lebensalterdosis

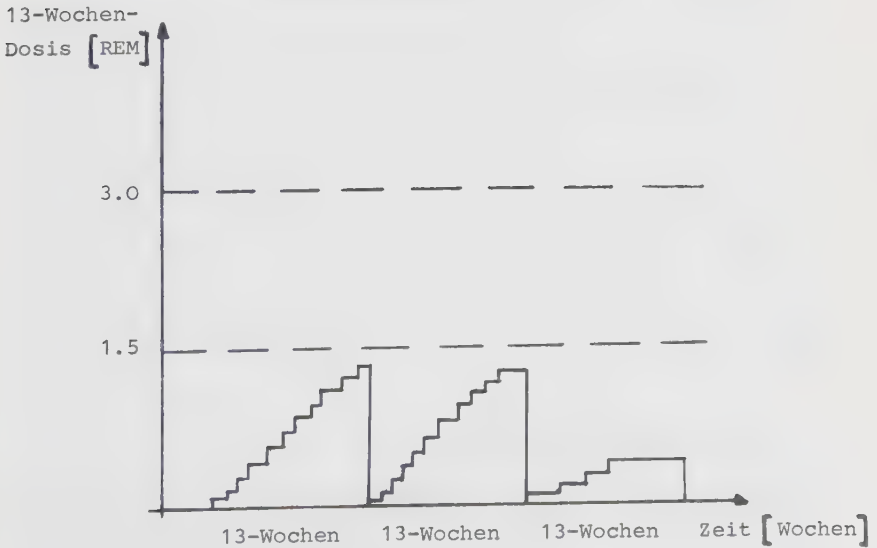


Abb. 3.2.2.1.2 - 2: Beispiel für den zeitlichen Verlauf der 13-Wochendosis

Als Beispiel seien die Ist-Werte für eine MTA (medizinisch-technische Assistentin) und einen Arzt genannt.

MTA 0.075 REM für die 13-Wochen-Dosis

Arzt 0.065 REM für die 13-Wochen-Dosis

Es ergibt sich damit für die MTA bei einer angenommenen Gesamtdauer von 20 Jahren als Beschäftigungszeitraum in einer Röntgenabteilung eine Gesamtdosis von 6,24 REM gegenüber einer zulässigen HL von 100 REM .

Für den Arzt ergibt sich bei angenommenen 30 Jahren Berufspraxis 6.0 REM gegenüber einer zulässigen HL von 150 REM .

Daraus ist ersichtlich, daß weder kurz- noch langfristig der Strahlenschutz des Personals Auswirkungen auf den Arbeitsablauf der Röntgenabteilung hat und daher in den nachfolgenden Abschnitten unberücksichtigt bleibt. Unberührt davon sind allerdings zusätzlich vorsorgliche Maßnahmen (beispielsweise Zusatzurlaub für weibliches Personal u.ä.).

Ein anderes Bild ergibt sich selbstverständlich in der Strahlentherapie, wo mit weit höheren Dosen zu rechnen ist.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist der Schutz der Patienten vor einer zu hohen Dosis an Röntgenstrahlen. Bei Untersuchungen treten im Falle von Durchleuchtungen Höchstdosen pro Patient und Untersuchung von bis zu 1 REM auf. Insbesondere sind Schwangere gefährdet. Durch die Röntgenschutzverordnung sind Bestimmungen geschaffen worden, die den Patienten vor einer lange dauernden Röntgenbelastung schützen sollen. Erste Auswirkungen scheinen sich schon eingestellt zu haben, wie sich aus der Untersuchung der Gesamtröntgenleistungen schließen läßt. Davon soll jedoch in Abschnitt 3.2.3 noch die Rede sein.

3.2.2.1.3 Röntgenaufnahmen

Die Röntgenstrahlung hat nun die bekannte Eigenschaft, ähnlich wie die elektromagnetische Strahlung im Frequenzband des sichtbaren Lichts, fotografische Schichten (Emulsionen)

so zu verändern, daß diese, sobald sie entwickelt sind, an den Stellen, an denen die Strahlung aufgetroffen ist, eine Schwärzung aufweisen. Wird nun die Röntgenstrahlung auf einen organischen Körper (Patient) gerichtet, so wird sie von diesem unterschiedlich stark absorbiert. Das Skelett beispielsweise absorbiert die Strahlung sehr viel stärker als das organische Gewebe. Dadurch ergeben sich hellere und dunklere Graufärbungen. Aus diesen Graufärbungen, die sozusagen ein Röntgen-Schattenbild des Körpers darstellen, kann der Röntgenologe pathologische Veränderungen erkennen. Um ein möglichst detailliertes Bild des Zustandes des Patienten zu gewinnen, werden auch Zielaufnahmen, Schichtaufnahmen, Kontrasteinläufe (absorbieren die Röntgenstrahlen und lassen das umgebende Gewebe, z.B. Darm, deutlich hervortreten) verwendet.

3.2.2.2 Struktur

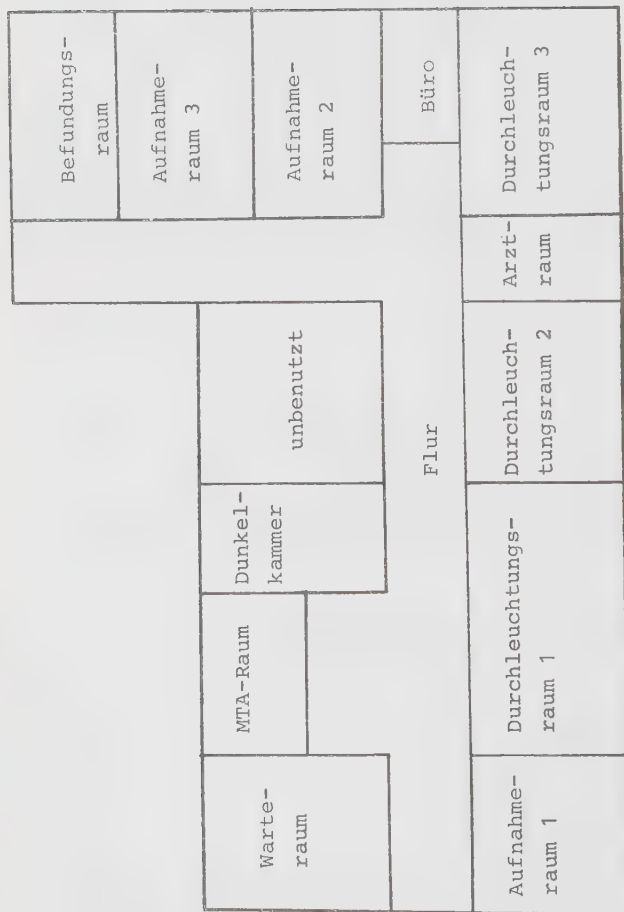
3.2.2.2.1 Arbeitsräume

Die Röntgenabteilung liegt im Erdgeschoß eines Traktes der Medizinischen Klinik. Sie besteht aus

- 6 Röntgenräumen (Durchleuchtungsräume D1-D3, Aufnahmeräume A1-A3)
- Wartezimmer
- MTA-Raum (Sortieren, Sofortbetrachtung usw.)
- Dunkelkammer
- Schreibbüro
- Befundungsraum
- Raum für Abteilungsleiter
- Vorratsraum
- Archiv (im Keller)

Abb. 3.2.2.2.1 - 1 zeigt (nicht maßstabsgetreu) die Anordnung der Räume.

Röntgenuntersuchungen in einem Operationssaal kommen wegen der spezifischen Aufgabenstellung der Klinik (innere Medizin) nicht vor.



Maßstab 1:400

Abb. 3.2.2.2.1 - 1: Grundriß der Röntgenabteilung

3.2.2.2.2 Arbeitsplätze

Es sind für die Röntgenabteilung folgende Arbeitsplätze vorgesehen:

- je eine MTA an den 6 Röntgengeräten
- je ein Arzt an den 3 Durchleuchtungsgeräten
- 2 Schreibplätze
- 1 MTA in der Dunkelkammer
- 1 MTA am Sortier- und Schreibtisch

Diese Arbeitsplätze können jedoch aufgrund der aktuellen Personalsituation nicht alle gleichzeitig besetzt werden. Daher müssen bestimmte Arbeiten statt parallel nacheinander ausgeführt werden.

3.2.2.2.3 Personal

Das Personal der Röntgenabteilung setzt sich aus 4 Röntgenologen, 8 MTA und 1 (Halbtags-)Schreibkraft und 1 Sekretärin zusammen; dazu kommen noch eine wechselnde Zahl von Internisten, die als Röntgenologen tätig sind.

Die Arbeitszeit beträgt, wie üblich im öffentlichen Dienst, 40 Stunden.

Die MTA setzen sich aus 5 Ganztagskräften, 2 Halbtagskräften, sowie einer MTA-Ausbilderin zusammen, die allerdings selten für den Routinebetrieb verfügbar ist, so daß tatsächlich jeweils nur 6 MTA dauernd für die Abteilung zur Verfügung stehen.

Der tägliche "offizielle" Arbeitsablauf beginnt um 8.00 Uhr, wird während der Mittagszeit 30 Minuten unterbrochen und endet um 16.30 Uhr. Allerdings kann diese Regelung im Routinebetrieb nicht aufrechterhalten werden.

So verschiebt sich die Mittagspause der MTA je nach Anforderungsanfall u.U. beträchtlich zum Nachmittag hin.

Die Arbeitszeit der Ärzte wird durch die Tatsache, daß das Befunden der entwickelten Filme frühestens am Nachmittag

einsetzen kann, so verlängert, daß ein Ende ihrer Befundungstätigkeit nach 19.00 Uhr keine Seltenheit ist.

Auf der anderen Seite tritt zwischen Mittagszeit und Befundungsbeginn eine gewisse Pause ein, die jedoch zum Teil durch Weiterbildung, MTA-Ausbildung, Erstellen von Gutachten ausgefüllt wird. Nach Auffassung der Röntgenologen umfassen diese Nebentätigkeiten pro Tag etwa 2 Stunden.

Die MTA sind abwechselnd an Samstagen zu einem Notdienst von 9.00 - 13.00 Uhr eingeteilt. Dabei ist dann jeweils nur eine MTA in der Röntgenabteilung anwesen. Darüber hinaus muß jeweils eine MTA während des gesamten Wochenendes für Notfälle verfügbar sein (Bereitschaftsdienst).

Die Arbeitszeit der Schreibkräfte beträgt im Falle der Halbtagskraft 20 Wochenstunden, das entspricht einer täglichen Anwesenheit von 8.00 - 12.00 Uhr. Für die Ganztagskraft gilt wieder die 40-Stunden-Woche. Abwesenheit des Personals wegen Urlaub oder Krankheit beeinflußt den Ablauf in der Röntgenabteilung beträchtlich. Für die Dauer von Urlaub oder Krankheit lassen sich nur grobe Schätzungen angeben. So dürfte die Zahl der Krankheitstage pro Person im Jahr ca. 7 betragen. Die Urlaubstage schwanken je nach Alter zwischen 18 und 30 Tagen.

3.2.2.3 Arbeitsablauf

3.2.2.3.1 Anforderungseingang

Die Anforderungen werden nach der Visite ausgestellt. Hierbei ist unter Anforderung der schriftliche oder mündliche Auftrag an eine Leistungsstelle zur Erstellung einer definitiven Leistung zu verstehen. Es werden dazu grüne Formulare (siehe Abb. 3.2.2.3.1 - 1 unten) für Untersuchungen des Verdauungstraktes und blaue (Abb. 3.2.2.3.1 - 1 oben) für sonstige Untersuchungen verwendet.

Die gewünschte Untersuchungsart wird angekreuzt. Die Anforderungen einer Station werden dann zur Röntgenabteilung gebracht. Dies sollte bis 13.00 Uhr geschehen sein, wenn die Untersuchung am nächsten Tag gewünscht wird. Der Einlauf ist im MTA-Zimmer.

Es sind weiter noch 2 Sonderfälle zu beachten. Außer angemeldeten stationären Patienten, sieht sich die Röntgenabteilung auch mit unangemeldeten stationären Patienten, sowie mit Notfällen konfrontiert. In der Leistungsstatistik der Röntgenabteilung wird jedoch kein Unterschied gemacht, so daß die Zahl der unangemeldeten Patienten nur aus Schätzungen des Personals bestimmt werden konnte.

Unangemeldete Patienten fallen dabei ausschließlich unter die Anforderungsarten Thorax und Knochen.

	mittlere Zahl der unangemeldeten Patienten pro Tag	mittlere Ankunftsrate λ_{un} [1/Minuten]
Thorax	6	0.0125
Knochen	4	0.00833

Tab. 3.2.2.3.1 - 1: Unangemeldete Patienten

Eine Aussage über die Notfälle läßt die Untersuchung von Kohlschreiber¹⁾ zu. Aussagen über unangemeldete Patienten sowie die Notfälle sind deswegen von Bedeutung, da sie über den ganzen Arbeitstag der Röntgenabteilung hinweg eintreffen und damit den geregelten Ablauf "stören". Zur Ermittlung des Ankunftsprozesses wären nun Messungen der Zwischenankunftszeiten notwendig. Da keinerlei Daten darüber vorlagen, wurde die Annahme getroffen, die Ankunftsprozesse von unangemeldeten Patienten und Notfällen seien jeweils Poisson-Prozesse. Diese Annahme wird durch andere empirische Untersuchungen²⁾ bestätigt.

1) Kohlschreiber (1974), Blatt 88 ff.

2) Ebenda; Schreiber (1975).

Beispielsweise ergibt sich für die Notfälle folgende Dichtefunktion der Poissonverteilung:

$$(3.2.2.3.1 - 1) \quad p_{\text{NOT}} = \frac{(\lambda_{\text{NOT}} t)^n}{n!} e^{-\lambda_{\text{NOT}} t} \quad n = 0, 1, 2, \dots \text{ Notfälle}$$

Die mittlere Ankunftsrate ergab sich dann jeweils als mittlere Zahl der Ankünfte pro Arbeitstag. Die Zeiteinheit beträgt 1 Minute. Die entsprechenden Werte sind in Tab. 3.2.2.3.1 - 1 und Tab. 3.2.2.3.1 - 2 zu sehen.

Die Dichte der Notfallszwischenankunftszeiten (Abb. 3.2.2.3.1 - 1) ist dann

$$(3.2.2.3.1 - 2) \quad f(t_{\text{NOT}}) = \lambda_{\text{NOT}} \cdot e^{-\lambda_{\text{NOT}} t_{\text{NOT}}}$$

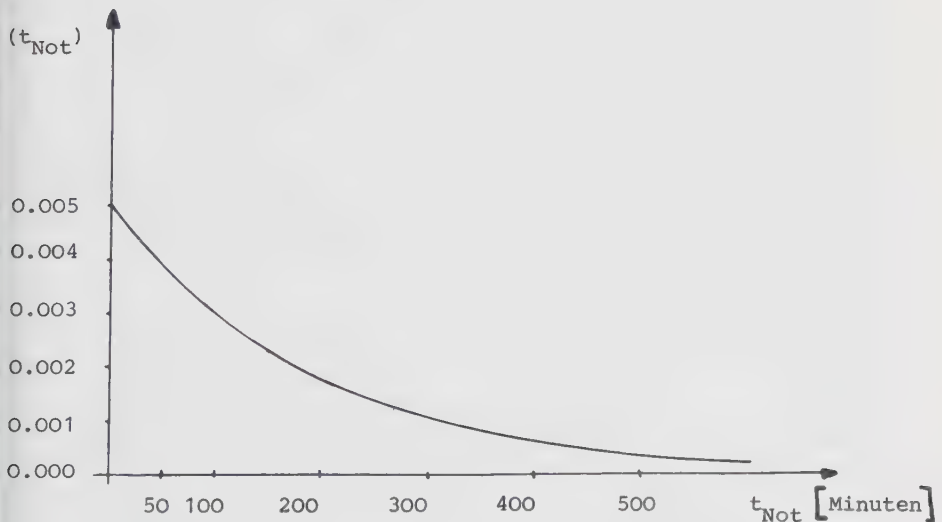


Abb. 3.2.2.3.1 - 1: Verteilungsdichte der Notfall-Zwischenankunftszeiten

Die zugehörige Verteilungsfunktion lautet

$$(3.2.2.3.1 - 3) \quad F(t_{\text{NOT}}) = 1 - e^{-\lambda_{\text{NOT}} t_{\text{NOT}}}$$

Dabei errechnet sich $\lambda_{\text{NOT}} = 0.00543$ wie folgt:

Da die Arbeit von Kohlschreiber keine direkten Angaben über die Zahl der Notfälle pro Arbeitstag der Röntgenabteilung macht, muß dieser Wert aus den vorhandenen Daten indirekt bestimmt werden. Die Zahl der insgesamt stationär behandelten Patienten der untersuchten Stichprobe betrug 3761. Die Zahl der Notfälle war 910. Das Verhältnis Notfälle zu Gesamtzahl der Patienten ist somit 0.2419. Es ist bei Kohlschreiber¹⁾ ferner ein Wert für die Zahl der Patienten zu finden, die während ihres Aufenthaltes in der Klinik zum ersten Mal geröntgt werden. Dies sind 2693 Fälle. Es wurde nun angenommen, daß das Verhältnis aus Notfällen und Gesamtzahl der Patienten gleich ist dem Verhältnis aus den Notfällen, die erstmalig während ihres Krankenhausaufenthaltes geröntgt und der Gesamtzahl der stationären Patienten, die erstmalig während ihres Aufenthaltes geröntgt wurden. Für den Ablauf in der Röntgenabteilung sollen aber nur solche Notfall-Patienten als Notfälle im engeren Sinne verstanden werden, die im Gegensatz zu den übrigen Patienten überraschend und ungeplant untersucht werden müssen. Darunter sind also nicht solche Notfälle, die den Überraschungseffekt bezüglich der Gesamtklinik, d.h. bezüglich der Bettenkapazität hatten, aber irgendwann im weiteren Verlauf ihres Heilungsprozesses zusammen mit anderen Nicht-Notfall-Patienten in der Röntgenabteilung untersucht wurden. Notfälle im engeren Sinne für die Röntgenabteilung sind also solche Notfallpatienten, für die am Tage vor ihrer Untersuchung in der Röntgenabteilung keine Anforderung vorliegt. Die Zahl dieser Notfälle im engeren Sinne ist, wie erwähnt, direkt nicht zu ermitteln. Man muß sich deshalb mit einer Schätzung begnügen. Sie wird jedenfalls kleiner als die Zahl der gesamten Notfälle sein (910) und größer als die Zahl der Notfallpatienten der Stationen 10 und 11²⁾ (321). Multipliziert man den Quotienten aus Notfällen und Gesamtpatienten mit der Zahl der Patienten, die erstmalig geröntgt

1) Kohlschreiber (1974), Blatt 88.

2) Aufnahme- und Intensivstation.

werden, so ergibt sich die Zahl der Notfälle, die erstmalig geröntgt werden, zu 632. Es muß dabei unterstellt werden, diese Patienten seien Notfälle im oben definierten engeren Sinne. Nimmt man ferner an, diese Patienten treffen im wesentlichen während der Routinearbeitszeit der Röntgenstation ein, bzw. werden erst dann untersucht, so ergibt sich bei 250 Arbeitstagen und 480 Arbeitsminuten pro Arbeitstag eine mittlere Ankunftsrate von $\lambda_{\text{NOT}} = 0.00543$.

Bei der Ermittlung der Ankunftsrate der unangemeldeten, stationären Nicht-Notfall-Patienten stützt man sich auf die geschätzte mittlere Zahl der unangemeldeten Patienten pro Tag.

Liegt die Notfallankunftsrate fest, so müssen noch die Wahrscheinlichkeiten für die Untersuchungsart dieses Notfalles bestimmt werden. Auch diese Werte waren nicht empirisch zu messen. Sie wurden durch Schätzungen des Personals ermittelt (Tab. 3.2.2.3.1 - 2). Damit kann die Wahrscheinlichkeit, daß im Zeitintervall "Arbeitstag" ein Notfall n_d eintrifft, an dem eine Untersuchung der Art d vorzunehmen ist, bestimmt werden. Diese bedingte Wahrscheinlichkeit $p(n_d | n)$ ergibt sich zu

$$(3.2.2.3.1 - 4) \quad p(n_d | n) = p(n) \cdot p(n_d)$$

Dabei ist $p(n)$ die Wahrscheinlichkeit für einen Notfall, $p(n_d)$ sind die Wahrscheinlichkeiten von Tab. 3.2.2.3.1 - 2. Vorausgesetzt ist die Unabhängigkeit der Ereignisse n und n_d .

Anforderungsart	Notfallwahrscheinlichkeit $p(n_d)$
Thorax	0.668
Trachea	0.011
Niere, Urogramm	0.037
Knochen	0.103
MDP	0.045
Colon	0.008
Galle	0.018
Pankreas	0.040
Abdomen	0.02

Tab. 3.2.2.3.1 - 2: Notfallwahrscheinlichkeiten

Diese Annahme trifft für die Medizinische Klinik näherungsweise zu.

Schließlich kann es manchmal noch vorkommen, daß für einen Patienten in der Röntgenabteilung mehr als eine Untersuchung pro Tag vorgesehen ist. In diesem Fall wird sich der Patient nach Absolvierung der ersten Untersuchung unmittelbar in die Warteschlange für den Röntgenraum, in dem die nächste Untersuchung erfolgt, einreihen, bzw. sofern auch diese im Raum der ersten Untersuchung stattfinden kann, wird die gesamte Anforderung in einem Arbeitsgang erledigt.

Im Modell wird ein derartiger Fall, der auch aus den vorliegenden Daten nicht zu konkretisieren ist, in zwei getrennte Einzeluntersuchungen aufgespalten.

3.2.2.3.2 Steuerung von Anforderungen und Patientenfluß (Sortier-

Die Anforderungen werden auf die MTA verteilt. Mit dem Beginn der Arbeitszeit werden die Patienten nach bestimmten Strategien durch einen Anruf auf den Stationen einbestellt. Der Anruf dauert im Mittel 3 Minuten. Dies ergaben Messungen im MTA-Raum. Die Patienten werden von der Stationsschwester informiert und begeben sich zur Röntgenstation. Die Zeitdauer vom Ende des Telefongesprächs bis zum Eintreffen des Patienten in der Röntgenabteilung konnte nicht gemessen werden. Es wurden daher Schätzungen der MTA verwendet. Der Ankunfts Vorgang wurde wiederum als Poissonstrom aufgefaßt, eine Annahme, die in der Warteschlangentheorie häufig getroffen wird. Es handelt sich darüber hinaus um ein Wartesystem mit begrenzter Quelle. Man erhält negativ exponentiell verteilte Zwischenankunftszeiten:

$$(3.2.2.3.2 - 1) \quad F(t) = 1 - e^{-\lambda_{an} t}$$

λ_{an} wurde für alle Anforderungen und Stationen als gleich angenommen. In Wirklichkeit sind einige Stationen natürlich weiter von der Röntgenstation entfernt als andere, folglich ergibt sich auch ein anderes λ_{an} .

Da die Zwischenankunftszeiten vom Personal der Röntgenabteilung nur geschätzt werden konnten, das Gesamtmodell der Röntgenabteilung aber sensitiv auf Änderungen des Ankunftsprozesses reagiert, wurde die mittlere Ankunftsrate λ_{an} als Parameter eingeführt, der mit 2 verschiedenen Werten besetzt wurde (Tab. 3.2.2.3.2 - 1).

Mittlere Zwischenankunftszeit T_{an}	mittlere Ankunftsrate λ_{an}	Zeit, in der 90% der Patienten ankommen $t_{90\%}$ [Minuten]
2.171	0.460	5.00
5.000	0.200	11.51

Tab. 3.2.2.3.2 - 1: Ankunftsprozeß

Dabei wurde als Auswahlkriterium die Zeit gewählt, in der sich höchstens 90 % der Patienten nach erfolgtem Anruf in der Röntgenabteilung eingefunden haben.

Nicht berücksichtigt wurde hier, daß die Patienten auch statt von den Stationen von anderen Leistungsstellen zur Röntgenabteilung gelangen können. Es wird damit stets angenommen, die Patienten seien auf den Stationen abrufbereit. Dies ist eine Annahme, die nicht immer zutrifft.

Eine weitere Möglichkeit der Anforderungssteuerung, die zu untersuchen wäre, ist die Existenz von Prioritätsregeln bezüglich des Anforderungseinganges. Darunter ist zu verstehen, daß u.U. ältere Patienten frühzeitiger am Tage untersucht werden, bettlägerige Patienten grundsätzlich Vortritt haben, bestimmte Stationen bevorzugt werden sollen, u.a.m.

Derartige Regeln bestehen offiziell an der betrachteten Klinik nicht, doch gibt es laut Auskunft der MTA in der Röntgenabteilung im Routinebetrieb bestimmte, teils traditionelle, teils medizinisch begründete Abweichungen von der First-in-First-out-Regel (FIFO). Für die weitere Untersuchung wurde angenommen, daß diese nicht quantifizierbaren Regelungen in der Einbestellstrategie der MTA implizit enthalten sind,

somit eine separate Betrachtung entfällt. Eine Ausnahme davon stellt die Berücksichtigung der zeitlichen Dauer einer Untersuchung dar. Hier wurden zwei von der FIFO-Regel abweichende einfache Prioritätsregeln eingeführt: Einbestellung der Patienten in einer Reihenfolge derart, daß

1. zeitlich kürzere Untersuchungen (SOT-Regel)
2. zeitlich längere Untersuchungen (LOT-Regel)

eher vorgenommen werden.

Komplexe Prioritätsregeln, wie sie aus der Reihenfolgeplanung bekannt sind, können hier aus mehreren Gründen nicht angewandt werden:

- a) Die Röntgenabteilung wird durch das vorliegende Modell aus dem Krankenhaus herausgelöst, die Schnittstellen des Modells der Röntgenabteilung bestehen nur gegenüber den Stationen. Innerhalb der Röntgenabteilung entsteht kein fortlaufender Arbeitsgang, da, wie noch erläutert wird, einzelne Tätigkeiten zu fest vorgegebenen Zeiten beginnen, z.B. Sortieren 2. Damit entfallen Prioritätsregeln, die mehrere aufeinanderfolgende Anforderungen bzw. Tätigkeiten einbeziehen.
- b) Die einzige Kopplung, die zwischen den Röntgenräumen besteht, ist über den Entwickler¹⁾ wirksam, da hier die sechs Untersuchungskanäle in einen Entwicklungskanal münden. Die Einwirkungen der Röntgenräume aufeinander sind daher auch vorhanden. Andere als die oben angegebenen Prioritätsregeln sind deswegen aber nicht erforderlich, da Filmanfall pro Untersuchung und damit die Entwicklungszeit näherungsweise proportional der Untersuchungszeit ist. Damit brauchen Regeln wie SRT bzw. LRT nicht untersucht zu werden, da sie implizit in den obigen Regeln in erster Näherung enthalten sind.
- c) Es konnten ferner nur einfache Regeln untersucht werden, da der Einbestellvorgang von einer MTA vorgenommen wird, die keinen klaren Überblick über den Tagesablauf eines

1) Zum Entwickler siehe Abschnitt 3.2.2.3.4.

speziellen Patienten hat und die ihre Einbestellentscheidungen so schnell treffen muß, daß für komplizierte Regeln kein Platz ist. Allerdings bestünde noch die Möglichkeit, einen nach dem Anforderungseingang genauen Einbestellplan für den nächsten Tag zu erstellen. Aber auch dann kann die verwendete Prioritätsregel nur sehr einfach strukturiert sein, da im Routinebetrieb bei Personalman- gel wenig Zeit dafür ist.

- d) Zudem stünde der Rechenzeitaufwand für die zusätzlichen Simulationsläufe in keinem Verhältnis zur Bedeutung des Ergebnisses.

Ein weiterer Entscheidungstatbestand ist die Steuerung der Größe der Bulks von Patienten, die pro Einbestellvorgang entstehen. Da dieses Problem jedoch eng mit der Röntgenuntersuchung verknüpft ist, soll erst im nächsten Abschnitt darauf eingegangen werden. Die MTA steuern ferner die Verteilung der Patienten je nach Untersuchungsart auf die entsprechenden Röntgenräume. Diese Zuordnung Untersuchungsart - Röntgenraum richtet sich nach der apparativen Ausstattung sowie organisatorischen Regeln, die sich im Laufe der Zeit herausgebildet haben. Tab. 3.2.2.3.2 - 2 zeigt diese Zuordnung. Die mit "fest" gekennzeichneten Untersuchungsarten kennzeichnen die zur Zeit in der Röntgenabteilung übliche Funktionsaufteilung der Röntgenräume.

3.2.2.3.3 Röntgenuntersuchung

Die Röntgenuntersuchung erfolgt in den sechs Röntgenräumen. Der Patient betritt nach Aufforderung der MTA die Umkleidekabine und entkleidet sich, während noch ein anderer Patient geröntgt wird. Nach Beendigung dieser vorangehenden Untersuchung gelangt der Patient durch die zweite Tür des Umkleideraumes in den Röntgenraum und wird von der MTA bzw. dem Arzt zum Töntgengerät geführt und dort so plazierte, wie für die angeforderte Untersuchung nötig ist. Darauf folgt der eigentliche Röntgenvorgang. Dieser besteht entweder aus einer einzelnen Aufnahme oder mehreren Aufnahmen, aus einer Durch-

Untersuchungsart	Zuordnung der Anforderungen	Untersuchung von Kassenpatient	Privatpatient	Prozentsatz der untersuchten Patienten
Thorax	möglich	D1, D2, D3		-
Trachea	"	"		-
Niere, Urogramm	"	"		-
Retropneu	"	D3		-
Bronchographie	fest	D3		100
Knochen	möglich	D1, D2, D3		-
MDP	fest	D2	D1	100
Colon	"	D2	D1	100
Galle	fest (oral)	D2	D1	70
Pankreas	möglich	D1, D2, D3		-
Abdomen	fest	D2	D1	70
NNH	möglich	D1, D2, D3		-
Angiographie	fest	D3		100
Lungenschicht	möglich	D1, D2, D3		-
Phleporaphie	fest	D3		100
Lymphographie	"	D3		100
Pharmakardiographie	"	D2	D1	100

Tab. 3.2.2.3.2 - 2: Zuordnung von Untersuchungen und Röntgenräumen

Untersuchungsart	Zuordnung der Anforderungen	Untersuchung von Kassenpatient	Prozentsatz der untersuchten Patienten
Thorax	fest	A1	100
Niere	möglich	A1	-
Knochen	"	A1	-
NNH	"	A1	-
Trachea	fest	A1	100
Lungenschicht	fest	A2	100
Galle	möglich	A2	-
Niere	fest	A2	100
Pankreas	möglich	A2	-
Abdomen	"	A2	-
Knochen	"	A2	-
Lymphographie	"	A2	-
Galle	fest (i.v.)	A3	30
Pankreas	fest	A3	100
Lymphographie	fest (2. Tag)	A3	100
Abdomen	fest	A3	30
NNH	"	A3	100
Niere	möglich	-	-
Knochen	fest	A3	100

Tab. 3.2.2.3.2 - 2 Fortsetzung

leuchtung oder einer Kombination von Aufnahmen und Durchleuchtung. Bei den Aufnahmen sollen Röntgengerät und Patient möglichst bewegungslos sein, um die notwendige Aufnahmeschärfe zu erreichen. Bei der Durchleuchtung wird das Röntgengerät zum Teil im Impulsbetrieb über die zu untersuchende Körperregion geführt. Bei manchen Untersuchungen werden Infusionen oder oral Kontrastbrei verabreicht. Nach Beendigung der Untersuchung begibt sich der Patient wieder in die Umkleidekabine. Gerät und Raum werden auf den nächsten Patienten vorbereitet. Dazu müssen u.a. am Schalterpult für das Röntgengerät die für die nachfolgende Untersuchung notwendigen Werte, z.B. Spannung (beeinflusst Frequenz) eingestellt werden. Die Tätigkeit der MTA am Schalterpult wird im folgenden unter Rüstzeit subsumiert. Ist die Zahl der möglichen Aufnahmen pro Film ausgeschöpft, wird die belichtete Filmkassette in die Entwicklungsschleuse gebracht und eine neue in das Röntgengerät eingelegt. Am Steuerpult werden die für die nächste Untersuchung nötigen Werte eingestellt.

Die für die vorliegende Untersuchung interessante Dauer der Röntgenuntersuchung wird wie folgt definiert:

Röntgendauer = Zeitpunkt zu dem der Patient den Röntgenraum betritt
- Zeitpunkt zu dem der Patient den Röntgenraum verläßt.

Nicht eingerechnet sind also die Aufräum- und Vorbereitungsarbeiten. Sie fallen unter die sogenannte Rüstzeit.

Die Dauer des Röntgenvorganges ist von mehreren, nur sehr schwer quantifizierbaren Einflüssen abhängig, wie

- Alter des Patienten (es beeinflusst seine Fähigkeit, seine Körperhaltung rasch zu ändern, wenn dies für Aufnahmeserien nötig ist)
- Art der Untersuchung (mit oder ohne Kontrastmittel usw.)
- Körperliche Verfassung und physiologisches Verhalten des Patienten (beispielsweise passieren Kontrastmittel den Magen-Darm-Trakt von Patienten unterschiedlich schnell)

- Erfahrung und Geschicklichkeit des Bedienungspersonals
- Zahl der entstehenden Filme
- Art und Ausstattung des Röntgengerätes
- Anzahl der Anforderungen

Da diese Einflüsse einzeln nicht oder nur sehr aufwendig meßbar sind, wurde darauf verzichtet, einen funktionalen Zusammenhang zwischen ihnen und der Röntgendauer herleiten zu wollen. Vielmehr wurden lediglich für jede der definierten Untersuchungsarten eine Zufallsvariable "Dauer dieser Untersuchung" eingeführt. In der gemessenen Verteilungsfunktion kommen dann die übrigen Einflüsse unspezifiziert zum Ausdruck. Eine Diskussion der Verteilungen erfolgt weiter unten.

Zum letzten der angeführten Einflüsse wäre noch anzumerken, daß darin die Flexibilität des Personals bezüglich der Arbeitsintensität zum Ausdruck kommt. Dieser Effekt mußte bei der vorliegenden Untersuchung vernachlässigt werden. Messungen im Kreiskrankenhaus Kulmbach¹⁾, einem Krankenhaus der Grundversorgung, lassen den Schluß zu, daß die Arbeitsintensität in mehreren Fällen direkt proportional zum Anforderungsanfall ist.

Rüstzeiten spielen nur bei wenigen Untersuchungen eine besondere Rolle. Daher wurde bis auf zwei Ausnahmen als Rüstzeit eine Minute festgelegt. Die Rüstzeiten sind selbst bei Kontrastuntersuchungen gering, da zum einen die Ärzte den notwendigen Kontrastbrei vor den Untersuchungen schon vorbereiten und dann nur noch verabreichen müssen (in Röntgendauer enthalten). Zum anderen werden bei der Verwendung von Infusionen nur die bereitliegenden Spritzen aufgenommen, demzufolge entsteht auch hier keine Rüstzeit.

Das Auswechseln der Kassetten geschieht jedesmal, wenn die maximale Zahl von Aufnahmen je Filmformat erreicht ist, aber spätestens nach jedem Patient. Allerdings muß die maximale Zahl von Aufnahmen nicht immer ausgeschöpft werden. Mit Ausnahme des Röntgenraums A 1 werden die Kassetten, die bei einem Patienten angefallen sind, aus dem Röntgenraum sofort zur Entwicklungsschleuse gebracht. Im Raum A 1 werden

1) Lutz (1976); Denner (1976).

die Kassetten von vier Patienten gesammelt, ehe sie zum Entwickler gebracht werden. Hier kommen fast nur Aufnahmen mit kurzer Dauer vor, d.h. es stellt sich eine hohe Patientenfrequenz ein, die es nahelegt, den Abfertigungsfluß möglichst selten zu unterbrechen. Es können je nach Untersuchungsart unterschiedliche Filmformate verwendet werden. Die maximale Zahl von Aufnahmen pro Filmformat zeigt Tab. 3.2.2.3.3 - 1.

Format [cm/cm]	13/18	18/24	24/30	35/35	20/40	30/40
Anzahl	2	4	4	3	1	1

Tab. 3.2.2.3.3 - 1: Maximale Zahl von Aufnahmen pro Film

Auch die verwendeten Formate, sowie die Zahl der pro Untersuchung entstehenden Filme sind Zufallsvariable. Verstärkt werden in jüngster Zeit Kamerafilme anstelle der Kassettenfilme eingesetzt. Neben der schnellen Bildfolge besteht beim Kamerafilm der Vorteil darin, daß drei bis fünf Untersuchungen pro Film möglich sind, so daß der zeitraubende Kassettenwechsel entfällt. Die Kamera wird vor jeder Untersuchung mit einer Lochkarte beschickt, auf der Name, Geburtstag, Station und Tag der Untersuchung verzeichnet ist (Abb. 3.2.2.3.3 - 2).

Med. Univ.-Klin. Erlangen, RÖ. - Abtlg.

0

1

2

3

4

5

6

7

8

9

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80

0

1

2

3

4

5

6

7

8

9

Abb. 3.2.2.3.3 - 2: Lochkarte für Kamerafilme

Es bestünde noch die Möglichkeit, auf der Lochkarte weitere Informationen zu speichern und auszuwerten, was jedoch in der Röntgenabteilung nicht praktiziert wird. Im D 1 können nur Kassetten belichtet werden. Im D 2 werden die Kamerafilme für Magenuntersuchungen eingesetzt. Dort werden ca. 80 % der gesamten Aufnahmen auf Kamerafilmen gemacht. Die Verwendung von Kamerafilmen wird im vorliegenden Modell allerdings nicht berücksichtigt. Dies hat zur Folge, daß die Untersuchungsdauern im Raum D 2 etwas zu lang angenommen werden.

In den Röntgenräumen A 1 - A 3 ist zur Untersuchung jeweils eine MTA notwendig. In den Räumen D 1 und D 2 sind es ein Arzt und eine MTA. Im Raum D 3 werden lange andauernde komplizierte Untersuchungen, wie Angiographie, Lymphographie durchgeführt. Hier sind mitunter zwei Ärzte und eine MTA für einen Patienten notwendig.

Die Röntgengeräte können wegen technischer Defekte ausfallen. Da die Herstellerfirma geographisch nahe liegt, ist der Schaden in der Regel schnell behoben. Die Schätzungen des Personals belaufen sich auf drei Ausfälle pro Jahr. Aufzeichnungen darüber waren nicht zu beschaffen. Dauert der Reparaturvorgang voraussichtlich länger als eine halbe Stunde, werden die Patienten auf die Stationen zurückgeschickt und später, u.U. auf einem anderen Gerät, geröntgt. Bei einer geschätzten Reparaturzeit von weniger als einer halben Stunde warten die Patienten bis zur Beendigung der Reparatur.

Eine weitere Möglichkeit, daß ein Röntgengerät ausfällt, ist die Erkrankung von Ärzten bzw. MTA. Tritt dieser Fall ein, so muß das Personal an mehr als einem Arbeitsplatz tätig sein, d.h. die Warteschlangen vor den Röntgenräumen werden immer abwechselnd abgearbeitet. Das Personal wechselt dann nach jedem Patienten den Arbeitsplatz. Dadurch verlängert sich natürlich die Wartezeit der Patienten und die Gesamtarbeitszeit des Personals beträchtlich.

Ein mehr oder minder "geplanter" Ausfall eines Gerätes entsteht durch den dem Personal zustehenden gesetzlichen Urlaub. Treffen die beiden Fälle Urlaub und Krankheit zusammen, so

kann es unter Umständen zu einem wochenlang andauernden Zustand kommen, bei dem das Personal aufgrund der speziellen Personalsituation (hauptsächlich MTA) zwei und drei Arbeitsplätze zu betreuen hat.

Alle drei beschriebenen Fälle, technischer Defekt, Krankheit, Urlaub, wurden nicht im Modell realisiert, da die Analyse des Routinebetriebs Vorrang hatte. Dennoch lassen sich relativ einfach Abschätzungen bezüglich der Auswirkungen dieser Ereignisse auf den Routinebetrieb anstellen.

3.2.2.3.4 Entwickeln der Filme

Das Entwickeln der Filme geschieht in der Dunkelkammer. Die belichteten Filme werden in einer halbautomatischen Entwicklermaschine weiter behandelt. Es entstehen Photonegative der Aufnahmen, die alle für den Röntgenologen notwendige Informationen enthalten. Beim Entwicklungsvorgang wird der Skribor mit einkopiert, so daß jedes Bild unverwechselbar einem Patienten zugeordnet werden kann. (Der Skribor ist ein Streifen, auf dem der Name des Patienten von einer MTA geschrieben wurde). Die Entwicklung der Filme geschieht unmittelbar nach der Einlieferung, da der Arbeitsplatz am Entwickler während der Untersuchungszeit ständig besetzt ist.

In der Dunkelkammer existiert nur eine Entwicklermaschine. Sie muß von der MTA, die für die Dunkelkammer eingeteilt ist, mit Entwicklerflüssigkeit beschickt werden.

Der Entwicklungsvorgang dauert 90 Sekunden pro Film. Es können jedoch unter Umständen zwei Filme zugleich eingelegt werden, wenn ihre Formate entsprechend kombinierbar sind (Tab. 3.2.2.3.4 - 1).

18/24	18/24	18/24	24/30	13/18	18/24
13/18	24/30	13/18	13/18	2 Kamerafilme	

Tab. 3.2.2.3.4 - 1: Kombinierbare Filmformate

Es ist möglich, schon ca. 30 Sekunden nach der Eingabe von ein oder zwei Filmen den Entwickler erneut zu beschicken, da dann der Entwicklungsvorgang genügend weit fortgeschritten ist. Beträgt die Zahl der entstandenen Filme pro Untersuchung Z_f , so ergibt sich für die gesamte Durchlaufzeit dieser Filme durch den Entwickler

$$(3.2.2.3.4 - 1) \quad t_{\text{ent}} = 90 + (Z_f - 1) \cdot 30 \text{ [Sekunden]}$$

In der Regel werden nur jeweils die Filme eines Patienten kombiniert und hintereinander in den Entwickler eingegeben.

Ein technischer Defekt des Entwicklers, der zum Ausfall führt, hat für den Arbeitsablauf in der Röntgenabteilung geringe Folgen. Die Aufnahmen werden in diesem Fall in der Abteilung für Endoskopie entwickelt. Die Ausfallwahrscheinlichkeit ist zudem sehr gering. Sie beträgt etwa $3 \cdot 10^{-3}$.

Daher brauchte der Entwicklerausfall im Modell nicht berücksichtigt werden. Das Gerät ist angeblich wartungsfrei bzw. wird bei Defekt "gewartet".

3.2.2.3.5 Kontrolle der Aufnahmen

Die entwickelten Aufnahmen werden vom Personal einer Sofortbetrachtung unterzogen, um festzustellen, ob Fehlaufnahmen vorgekommen sind. Fehlaufnahmen rühren von vielerlei möglichen Ursachen her: Der Patient kann sich bewegt haben, das Röntgengerät kann bei der Aufnahme versagt haben, dem Aufnehmenden unterlief ein Bedienungsfehler oder der Film war fehlerhaft. Zur Sofortbetrachtung der Aufnahmen werden die Ärzte aus dem Befundungszimmer über Sprechanlage herbeigerufen bzw. die MTA zeigt die Aufnahme im Befundungszimmer. Die MTA überprüfen ihre eigenen Aufnahmen selbst. Ist keine Fehlaufnahme zu verzeichnen, verläßt der Patient die Röntgenabteilung. Andernfalls muß die Aufnahme wiederholt werden. Die Wahrscheinlichkeit für eine oder mehrere Fehlaufnahmen pro Patient wird mit $0.01^{1)}$ angesetzt. Eine Wiederholung von

1) Dieser Wert basiert auf Schätzungen des Personals.

fehlerhaften Aufnahmen ist allerdings nur bei solchen Aufnahmen möglich, die keine Vorbereitung des Patienten erfordern (Tab. 3.2.2.3 - 5). In allen anderen Fällen z.B. Aufnahmen mit Kontrast wird eine einzelne Aufnahme nicht wiederholt. Nur wenn mehrere Aufnahmen von einem Patienten fehlerhaft sind und eine Befundung daher nicht mehr möglich ist, erfolgt eine neue Untersuchung (in der Regel einen oder mehrere Tage später).

Thorax
Trachea
Niere
Knochen
Pankreas
Abdomen
NNH
Lungenschicht

Tab. 3.2.2.3 - 5: Untersuchungen bei denen Wiederholungen möglich sind

3.2.2.3.6 Ordnen und Etikettieren der Filme (Sortieren 2)

Sind die Filme entwickelt und auf Fehlaufnahmen untersucht, müssen sie durch die MTA zum Befunden vorbereitet werden. Dazu werden aus dem Archiv eventuell vorhandene ältere Aufnahmen des betreffenden Patienten geholt und mit den neuen Filmen in ein Kuvert gelegt, das mit dem Namen des Patienten versehen wird. Ferner wird eine Eintragung in das Leistungsbuch vorgenommen.

Zusammen mit dem Anforderungsschein werden die Filmkuverts dann auf die einzelnen Röntgenologen verteilt. Dabei wird von seiten der MTA darauf geachtet, daß einerseits die Zahl der zu befundenden Patienten pro Arzt annähernd gleich ist, andererseits die Röntgenologen auch möglichst die von ihnen vorgenommenen Untersuchungen selbst befunden.

Als Besonderheit ist noch anzumerken, daß die im Rahmen ihrer Facharztausbildung tätigen Internisten, die an einem Befundungsplatz arbeiten, nur ca. 10 % des gesamten Befundungsfalles zu bewältigen haben.

Eine Problematik, die nicht im Modell berücksichtigt wurde, ist die Tatsache, daß ältere, in der Röntgenabteilung aufgenommene Filme, aus verschiedensten Gründen auf den Stationen geblieben sind. In diesem Fall wird die Befundung unter Umständen erst Tage später, wenn diese Aufnahmen in der Röntgenabteilung eingetroffen sind, vorgenommen. Quantitative Aussagen über diesen Sachverhalt waren allerdings nicht zu gewinnen. Aufgrund der Personalsituation (Sortierplatz ist vormittags nicht besetzt) ist der früheste Beginn des Sortierens 2 gegen 13.00 Uhr.

3.2.2.3.7 Befundung

Unter Befundung versteht man den Vorgang mit dem aus den Röntgenaufnahmen Schlüsse auf pathologische Veränderungen im Organismus des Patienten gezogen und die Speicherung dieser Schlußfolgerungen auf einem geeigneten Träger.

Die Filme werden von einer MTA am Nachmittag in das Befundungszimmer gebracht. Es werden alle Filme von den Ärzten befundet, auch solche, die von MTA belichtet wurden.

Die Befundung setzt sich aus einer gemeinsamen Vorbesprechung aller in der Röntgenabteilung tätigen Ärzte und dem individuellen Befunden zusammen. Erst erfolgt die gemeinsame Befundungsbesprechung, in der kritische Fälle geklärt werden, dann die Einzelbefundung. Die Filme werden an die beleuchteten Schaukästen angesteckt und befundet. Das Ergebnis wird auf Tonband gesprochen. Es stehen vier Tonbänder im Befundungsraum zur Verfügung. Im Raum des Abteilungsleiters ist das fünfte.

Die Dauer der Befundung hängt wieder von mehreren, nicht quantifizierbaren Einflüssen ab, wie

- Erfahrung und Können des Arztes

- Güte der Aufnahme
- physische Gegebenheiten des Patienten
- Ausstattung und Technik der Befundungseinrichtungen
- Zahl der Aufnahmen
- Untersuchungsart.

Diese Einflüsse konnten getrennt nicht berücksichtigt werden, so daß lediglich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung $F(x_i)$ betrachtet wurde, wobei x_i die Zufallsvariable Dauer der Befundung einer Untersuchung der Art i ($i=1,2,\dots,18, i\neq 5$) darstellt. Dabei bedeutet $i\neq 5$, daß Retropneumuntersuchungen nicht in der Röntgenabteilung befundet werden.

Die Befundung findet in der Medizinischen Klinik generell nachmittags statt, da wie oben erwähnt, der Sortiervorgang durch die MTA nicht vor Ende der vormittäglichen Röntgenuntersuchungen stattfinden kann.

Die Fehlerrate beim Befunden, d.h. Fehldiagnosen dürften aufgrund der hohen Qualifikation der Fachärzte und des gemeinsamen Befundes gering sein. Beim Befunden werden auch Internisten eingesetzt, die allerdings nicht die Erfahrung und Schnelligkeit der Röntgenologen haben können. Ihre verminderte Befundungsgeschwindigkeit wird im Modell berücksichtigt. Es wird angenommen, daß ihre Befundungsgeschwindigkeit ein Drittel derjenigen der Röntgenologen¹⁾ beträgt.

Fällt wegen Krankheit oder Urlaub ein Röntgenologe aus, so befunden die übrigen diesen Teil der Aufnahmen noch am selben Tag mit. Dadurch verlängert sich natürlich deren Arbeitszeit z.T. beträchtlich.

Als neueste Entwicklung, die berücksichtigt werden mußte, zeichnet sich eine verstärkte Fremdbilderbefundung ab. D.h. die Befundung stützt sich auf Röntgenaufnahmen, die nicht in der Röntgenabteilung der Medizinischen Klinik gemacht wurden. Auf die Ursachen dieser Entwicklung wird weiter unten eingegangen. Damit erspart man sich eine Doppel-Röntgenuntersu-

1) Dieser Wert stützt sich auf Schätzungen von Röntgenologen und Internisten. Weitere Qualifikationsdifferenzierungen werden nicht vorgenommen, da sie nur sehr schwer meßbar sind. Sie sind in den Befundungsdauerverteilungen enthalten.

chung und dem Patienten eine weitere Strahlenbelastung. Die Fremdbilder werden mit den Filmen aus der Röntgenabteilung von den MTA sortiert, den Ärzten zugeteilt und am Nachmittag zum Befunden gebracht.

Eine weitere Besonderheit stellen die Wochenendaufnahmen dar. Diese Aufnahmen gehen am Wochenende auf die Stationen. Von dort kommen sie erst am Montag oder Dienstag, oft auch viel später wieder in die Röntgenabteilung zur Befundung zurück. Auch hier waren die Angaben zu ungenau, um diesen Tatbestand in das Modell einbauen zu können. Die Zahl der Fremdbefundungen pro Tag x wurde als gleichverteilte Zufallsvariable mit einem Definitionsbereich von 0 - 6 Befunde angenommen.

$$(3.2.2.3.7 - 1) \quad f(x) = \begin{cases} 1/7 & 0 \leq x \leq 6 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases}$$

Diese Annahme ergab sich aus Befragungen des Personals.

3.2.2.3.8 Schreiben der Befunde

Die mit den Befunden besprochenen Tonbänder werden am Tag nach der Befundung von einer MTA in das Zimmer der Schreibkräfte gebracht. Dort werden sie abgehört und der Befund auf Formulare mit Schreibmaschine übertragen. Die Formulare sind im Falle von Untersuchungen des Verdauungstraktes Randlochkarten mit einem Deckblatt, das als Befundungsbericht an die Stationen geht (Abb. 3.2.2.3.8 - 1).

Die eigentliche Lochkarte wird in einer Kartei archiviert. Am Rande der Lochkarten sind für statistische Zwecke wichtige Befundungssichworte angegeben. An dieser Stelle ist jeweils ein Loch. Es sollten dann alle Löcher zu u-förmigen Einkerbungen erweitert werden, die nicht als Stichworte für den Befundungsinhalt dienen.

Zu Zwecken der wissenschaftlichen Auswertung könnten dann nach bestimmten Gesichtspunkten (z.B. alle Colonuntersuchungen), die interessierende Lochkarte unter Verwendung einer Nadel leicht dadurch aussortiert werden, daß man an der entsprechenden Stelle durch alle Lochkarten hindurchsticht

und die Nadel anhebt. Dann bleiben alle Karten gemäß dem gewünschten Kriterium hängen, die übrigen bleiben stehen.

Bei Ausfall einer Schreibkraft verrichtet die andere die gesamten Aufgaben. Allerdings hat dann das Schreiben der Befunde vor den übrigen Verwaltungsaufgaben Vorrang.

Die Halbtagskraft kann zudem ihre Arbeitszeit je nach Arbeitsanfall und eigenem Bedürfnis innerhalb eines Arbeitstages variieren. Ihre Wochenarbeitszeit beträgt 20 Stunden.

Sind sämtliche Befunde des Vortages geschrieben, werden sie in die Stationsfächer sortiert. Erfahrungsgemäß geschieht dies gegen Mittag.

3.2.2.3.9 Befundweitergabe

Sobald sämtliche Befunde geschrieben sind, werden sie zusammen mit den Aufnahmen und den Anforderungsscheinen in das Stationsfach gelegt, von dort werden sie von einer der betreffenden Stationsschwestern abgeholt.

Um 8.00 Uhr morgens desselben Tages findet schon eine Besprechung der Internisten mit einem Röntgenologen statt, in der kritische Befunde vorab erläutert werden.

Den Stationen wird nicht mitgeteilt, daß die Befunde abholbereit liegen. In der Regel werden die Befunde im Laufe des Nachmittags abgeholt. Allerdings kommt es auch häufig vor, daß Befunde von einzelnen Stationen einen oder mehrere Tage liegen bleiben. Auch hier erfolgt in der Regel keine Anmahnung.

3.2.2.3.10 Verwaltung, Versorgung

Verwaltung und Versorgungsmaßnahmen werden teils vom medizinischen Personal selbst, teils von der Ganztagsschreibkraft (Gehalt, Verbrauchsmaterial), teils von der zentralen Klinikverwaltung abgewickelt.

3.2.2.3.11 Gesamtablauf

Abb. 3.2.2.3.11 - 1 stellt den Gesamtarbeitsablauf in der Röntgenabteilung dar. Eine Reihe von Tätigkeiten und Kommunikationsbeziehungen mußte jedoch vernachlässigt werden, da sie das Gesamtmodell unnötig kompliziert hätten, ohne größere Bedeutung für den Arbeitsablauf zu haben. So wurde z.B. das Suchen alter Filme im Archiv ausgespart.

In der Abbildung sind zeitverbrauchende Tätigkeiten als rechteckige Kästchen dargestellt, ebenso Arbeitsplätze, Räume, Aufbewahrungsfächer und dergleichen mehr.

Ausgezogene Verbindungslinien stellen entweder Materialtransport (Filme, Formulare) oder den Übergang von Patienten und Personal von einem Raum zum anderen bzw. von einer Tätigkeit zur anderen dar.

Die gestrichelten Verbindungslinien sind dagegen als Kommunikationsstränge aufzufassen.

Der abgebildete Ablauf erstreckt sich zeitlich über drei Tage. Nennt man den Tag der Anforderungsausstellung i , so ist der gesamte Ablauf am Tag $i+2$ beendet. Am Tag i wird in der Abbildung der untere Teil bis Sortieren 1 durchlaufen. (Nachmittag des Tages i).

Der untere Teil der Abbildung bis zum Ende des Befundens, sowie den gesamten oberen Teil (Patienten) bildet den Ablauf am Tag $i+1$. Der Rest geschieht am Tag $i+2$.

Der Materialtransport erstreckt sich zum Teil über beträchtliche Entfernungen, auch wenn er sich nur in der Röntgenstation abspielt. So sind die zurückzulegenden Gehstrecken bis ca. 40 m lang. Damit hat die Anordnung der Räume zueinander einen Einfluß auf die Leistungserstellung der Röntgenabteilung insgesamt. Abb. 3.2.2.2.1 - 1 zeigt die Anordnung der Röntgenabteilung im Maßstab 1:400. In Abb. 3.2.2.3.11 - 2 sind die Wege eingezeichnet, die eine MTA für die Bearbeitung einer Anforderung, die im Aufnahmeraum 3 vor sich geht, zurücklegen muß.

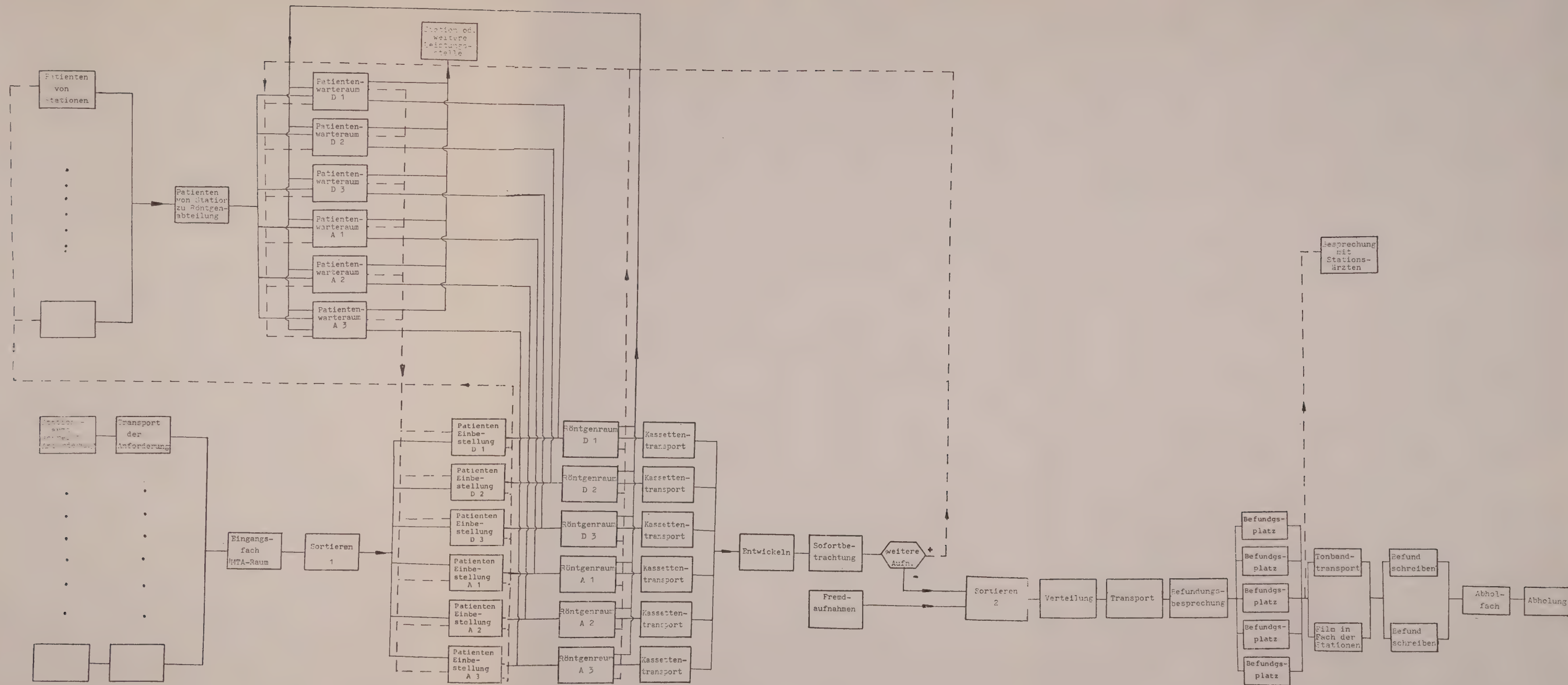


Abb. 3.2.2.3.11 - 1: Modell der Röntgenabteilung



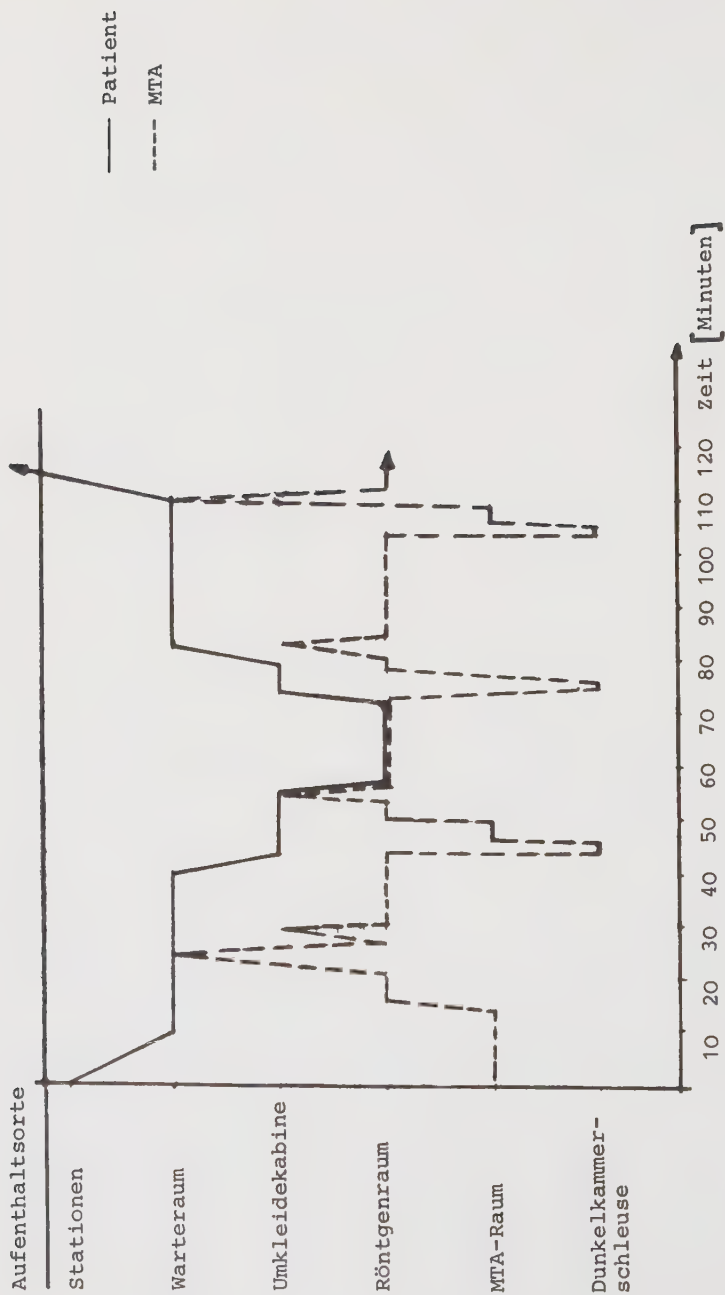


Abb. 3.2.2.3.11 - 2: Ort-Zeit-Diagramm für MTA und Patient

Die Dauer der für die einzelnen Wegstrecken notwendigen Gehzeit berechnet sich zu

$$(3.2.2.3.11 - 1) \quad T = \frac{2s}{c} \text{ [Minuten]}$$

Dabei ist c die mittlere Gehgeschwindigkeit und s der zurückgelegte Weg. Da der Weg hin und zurück zu gehen ist, wird der Quotient noch mit 2 multipliziert.

Die entsprechenden Werte für die Röntgenstation gibt. Tab. 3.2.2.3.11 - 1 wieder.

Raum	Schleuse	Dunkelkammer	
D1	18,5	21,5	[Meter]
D2	9,5	21,5	"
D3	10,5	24,0	"
A1	16,0	-	"
A2	15,0	-	"
A3	22,5	-	"
Befundungszimmer	47,5	-	"
Dunkelraum	19,5	-	"

$$\text{Mittlere Gehgeschwindigkeit} = 25 \left[\frac{\text{Meter}}{\text{Minuten}} \right]$$

MTA-Wartezeit in den Räumen D1-D3 = 1.0 [Minuten]

MTA-Wartezeit in den Räumen A1-A3 = 2.0 [Minuten]

Tätigkeitsdauer bei Transport der

Kassetten zur Schleuse = 3.0 [Minuten]

Tab. 3.2.2.3.11 - 1: Transportparameter

Dazu kommen noch additiv Warte- und Suchzeiten (nach einem Arzt) bei der Sofortbetrachtung. Zeiten für das Herausnehmen und Verstauen der Filme aus dem Röntgengerät bzw. in die Entwicklerschleuse fallen beim Transport der belichteten Filme zum Entwickler an. Für die Sofortbetrachtung von Aufnahmen aus den Durchleuchtungsräumen fallen keine Gehzeiten an, da ein Arzt anwesend ist.

In Tab. 3.2.2.3.11 - 1 sind auch diese zusätzlichen Zeiten zu finden.

In Abb. 3.2.2.3.11 - 2 wird der räumlich-zeitliche Verlauf bei der Leistungserstellung von Arzt, MTA und Patient am Beispiel des Durchleuchtungsraums wiedergegeben. Deutlich ist hierbei das beträchtliche Gehpensum der MTA zu sehen.

3.2.3 Daten

3.2.3.1 Datenerhebung

Abgesehen von den schon oben größtenteils angegebenen Strukturdaten der Röntgenabteilung, waren in der Hauptsache Anforderungsstatistiken zu erstellen und Tätigkeitsdauern sowie Materialverbräuche zu ermitteln. Auf vorhandenes Datenmaterial konnte aus zweierlei Gründen nicht zurückgegriffen werden:

1. Datenerhebungen von medizinischen Tätigkeitsdauern bzw. Materialverbräuchen sind äußerst spärlich in der Literatur zu finden.
2. Selbst existierende Daten wären praktisch nicht auf die speziellen Gegebenheiten der Medizinischen Klinik der Universität Erlangen-Nürnberg anwendbar.

Die Anforderungsstatistiken konnten mit Hilfe des Leistungsbuches der Röntgenabteilung ermittelt werden. Hier werden sämtliche Leistungen am Tage der Entstehung mit dem Namen des Patienten, dem Filmverbrauch, den Filmformaten, sowie Vermerken über Magenuntersuchungen, Kontrasteinlauf u.ä. eingetragen. Zugrunde gelegt wurde das gesamte Jahr 1973.

Die einzelnen Anforderungsarten wurden zu 18 Gruppen zusammengefaßt. Diese Einteilung entspricht den Eintragungen im Leistungsbuch. Einzelne Anforderungsarten wurden zusätzlich zusammengefaßt. So sind unter der Anforderungsart "Knochen" Röntgenuntersuchungen der Wirbelsäule, des Kopfes sowie der Extremitäten vereinigt. In Tab. 3.2.3.1 - 1 sind die 18 Gruppen in willkürlicher Reihenfolge aufgeführt. Jeder Gruppe wurde eine ganze Zahl zur Identifizierung zugeordnet.

Die Zahl der Anforderungen ist nur bei den Untersuchungen des Verdauungstraktes begrenzt (20 Anforderungen maximal).

Die MTA's achten allerdings darauf, daß an einem Tag eine Station nicht allzu viele Anforderungen abgibt. Der Anforderungsanfall schwankt je nach Wochentag. Die Zahl der Anforderungen pro Untersuchungsart wurden als eine Zufallsvariable aufgefaßt.

- 1 Thorax
- 2 Trachea
- 3 Niere
- 4 Urogramm
- 5 Retropneu
- 6 Bronchographie
- 7 Knochen
- 8 M D P
- 9 Colon
- 10 Galle
- 11 Pankreas
- 12 Abdomen
- 13 N N H
- 14 Angiographie
- 15 Lungenschicht
- 16 Phlepographie
- 17 Lymphographie
- 18 Pharmakardiographie

Tab. 3.2.3.1 - 1: Untersuchungsarten

Die Vorgehensweise war bei der Erstellung der Anforderungsstatistik folgende: Zuerst wurden die Tagesanforderungen auf maschinenlesbare Markierungsbogen übertragen. Die Information der Markierungsbogen wurde dann auch Lochkarten übertragen. Die auf Lochkarten gespeicherten Daten dienten schließlich zur Erstellung von Häufigkeitsverteilungen und der Ermittlung deren Parameter.

Die Erstellung der Statistiken für die Tätigkeitsdauern gestaltete sich wesentlich schwieriger. Es mußte hier störend

in einen Routinebetrieb eingegriffen werden, da die Tätigkeitsdauern durch Selbstaufschreibung des Personals festgestellt wurden. Durch Notieren von Anfangs- und Endzeitpunkt einer bestimmten Tätigkeit auf einem vorgedruckten Formular ließ sich die eigentliche Tätigkeitsdauer errechnen. Selbstverständlich ist diese Vorgehensweise problematisch, war aber unter den gegebenen Umständen die einzig mögliche.

Es können dabei bewußte und unbewußte Verfälschungen der wahren Zeit vorkommen. Ferner konnten von einigen Tätigkeiten nur von einer Person Zeiten gewonnen werden. Der Stichprobenumfang war bei selteneren Untersuchungen für Testzwecke zu gering. Von einer Reihe von Untersuchungen konnten deshalb nur Schätzungen angegeben werden.

Es ergaben sich letztlich drei Typen von Verteilungen:

1. Empirische Verteilungen
2. Empirische Verteilungen, die durch analytische Verteilungen angenähert werden konnten
3. Schätzverteilungen.

3.2.3.2 Datenaufbereitung

3.2.3.2.1 Tätigkeitsdauern

Der Typ 1 der gewonnenen Verteilungen bedurfte im wesentlichen keiner besonderen Aufbereitung. Hier war der Stichprobenumfang für Testzwecke zu gering. Für den Typ 2 wurde zur Überprüfung von vermuteten, analytischen Verteilungen der χ^2 -Test¹⁾ verwendet. Dies war nur dann möglich, wenn der Stichprobenumfang ausreichend war, d.h. er mußte im Falle des verwendeten Testverfahrens mehr als 25 Werte umfassen.

Als Schätzverteilung - Typ 3 - wurde aufgrund der in Abschnitt 2.3 beschriebenen Ergebnisse für die Tätigkeitsdauern die logarithmische Normalverteilung gewählt. Auf eine Schätzverteilung mußte dann zurückgegriffen werden, wenn die Zahl der Realisationen einer speziellen Tätigkeitsdauer während der Datenerhebung 0 oder 1 betrug.

1) Siehe hierzu etwa Heinhold, Gaede (1972), S. 287.

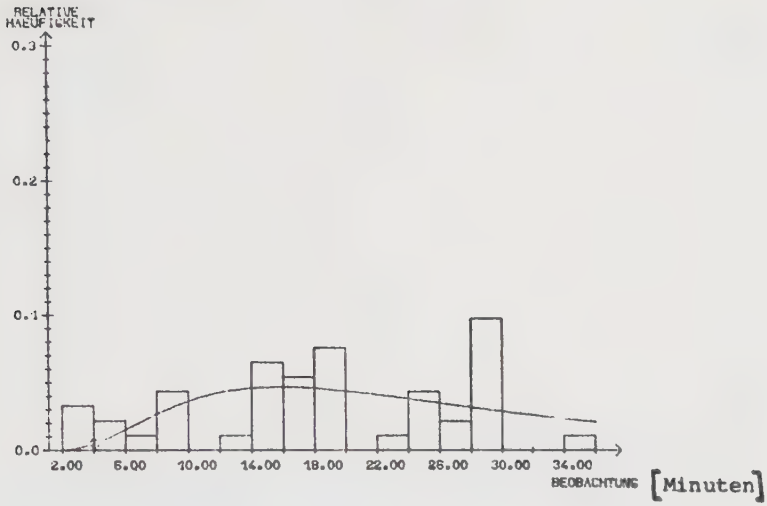


Abb. 3.2.3.2.1 - 1: MDP-Untersuchung in D1-D2

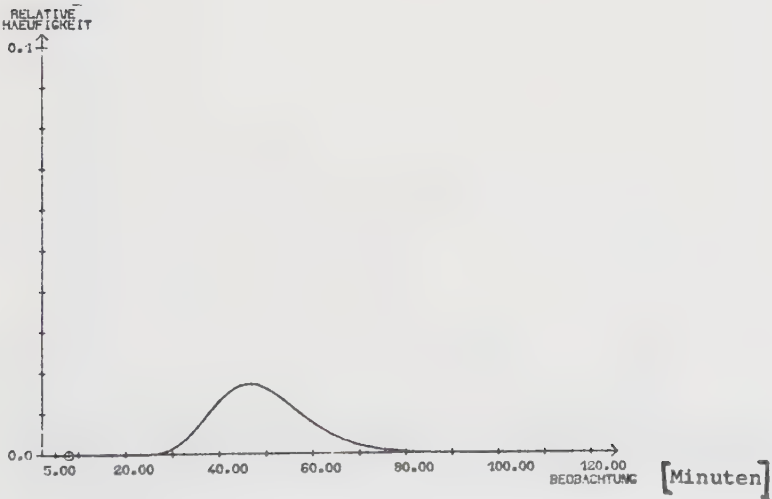


Abb. 3.2.3.2.1 - 2: Retropneu-Untersuchung in D3

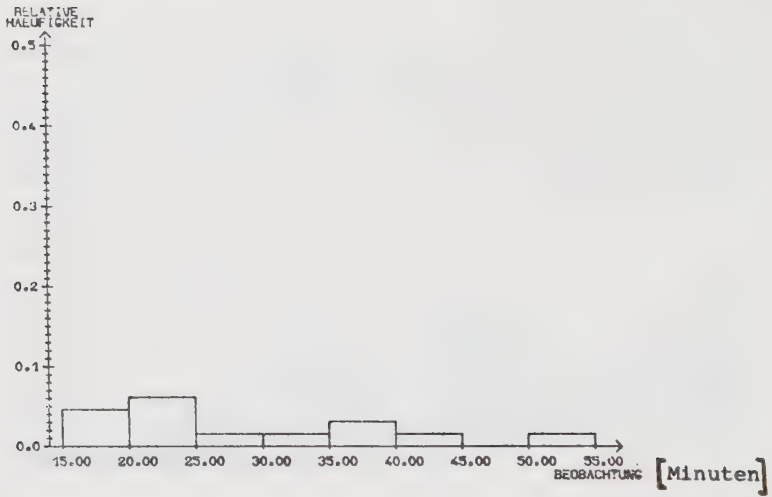


Abb. 3.2.3.2.1 - 3: Colon-Untersuchung in D1-D2

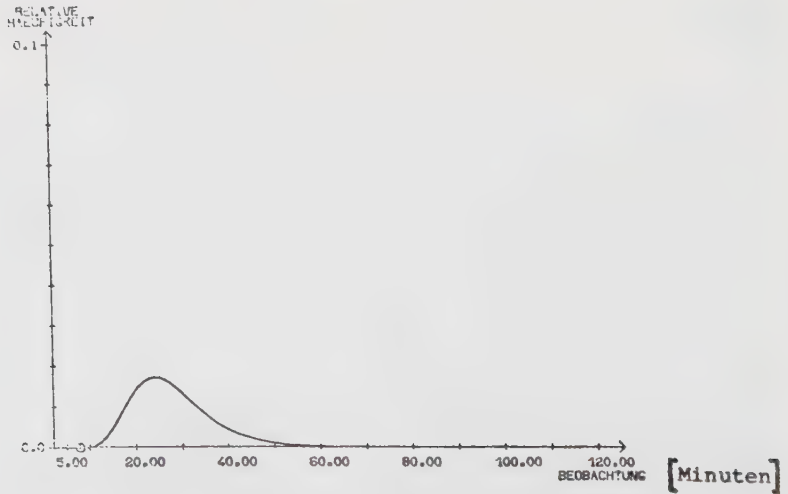


Abb. 3.2.3.2.1 - 4: Bronchographie-Untersuchung in D3

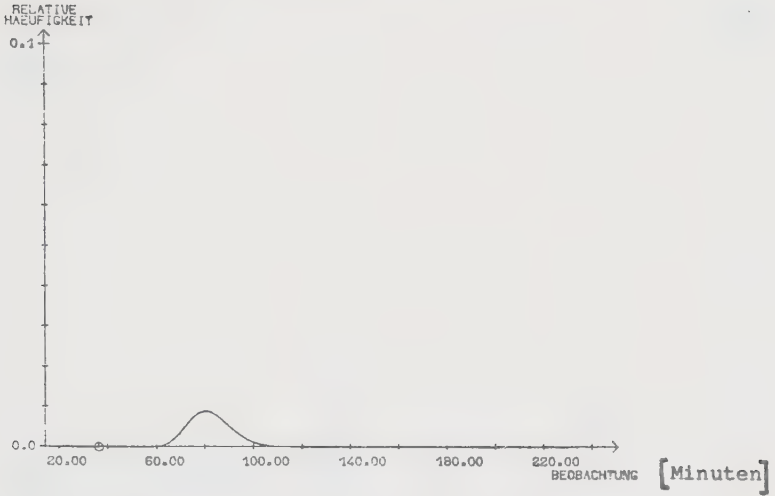


Abb. 3.2.3.2.1 - 5: Angiographie-Untersuchung in D3



Abb. 3.2.3.2.1 - 6: Abdomen-Untersuchung in D1-D2

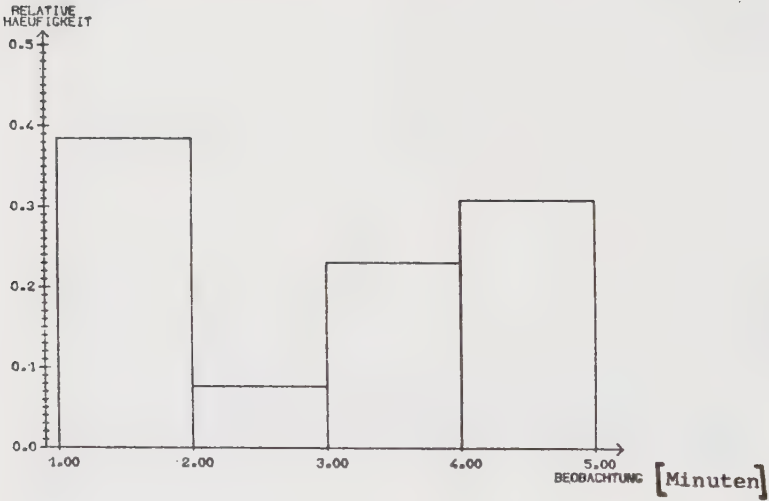


Abb. 3.2.3.2.1 - 7: Galle-Untersuchung in D1-D2

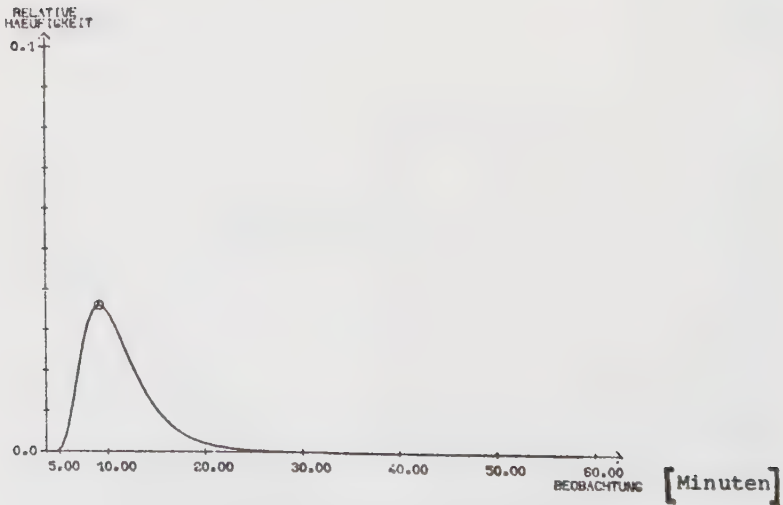


Abb. 3.2.3.2.1 - 8: Lymphographie-Untersuchung in D3

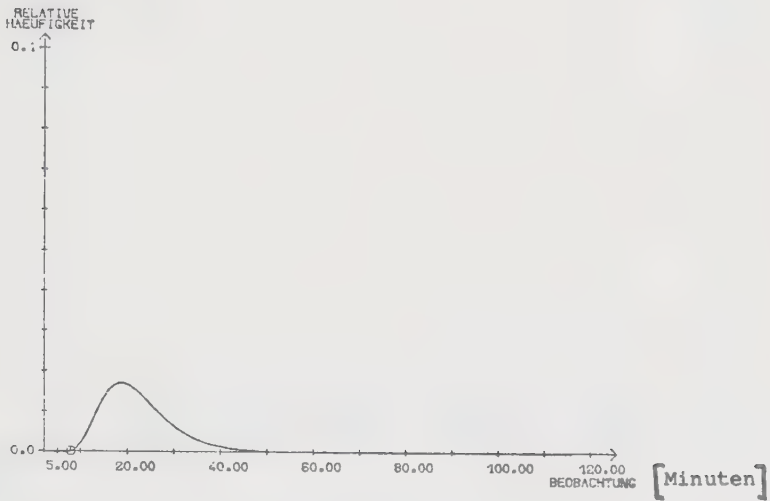


Abb. 3.2.3.2.1 - 9: Phlepographie-Untersuchung in D3

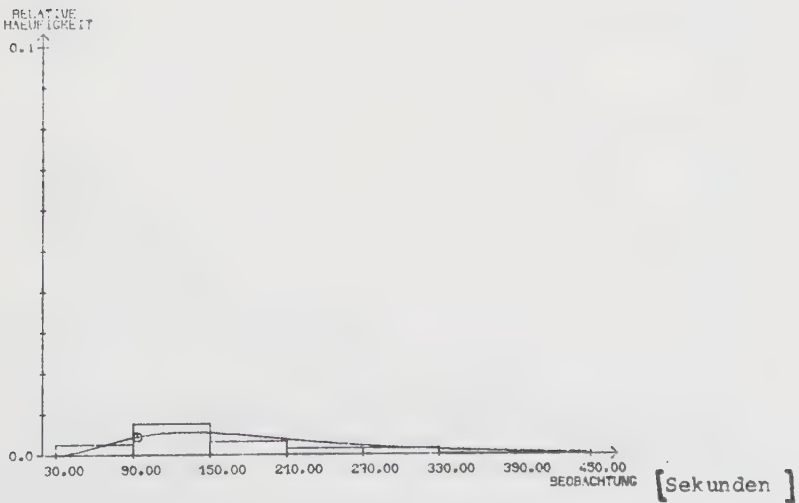


Abb. 3.2.3.2.1 - 10: Thorax-Untersuchung in A1

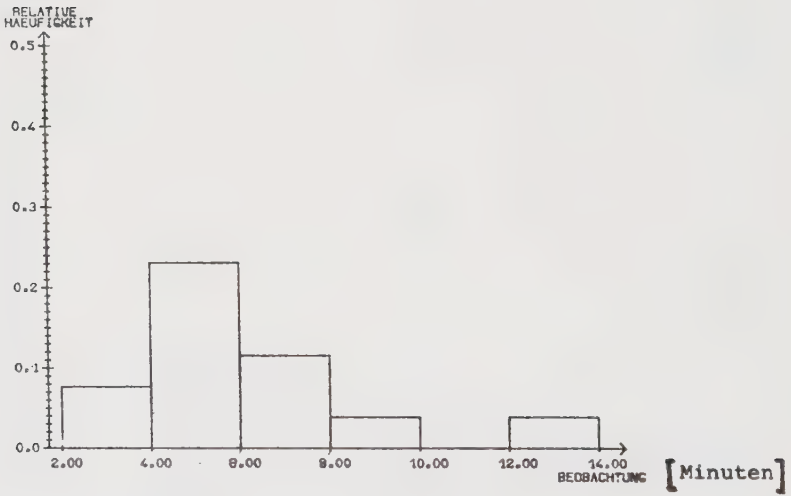


Abb. 3.2.3.2.1 - 11: Trachea-Untersuchung in A1

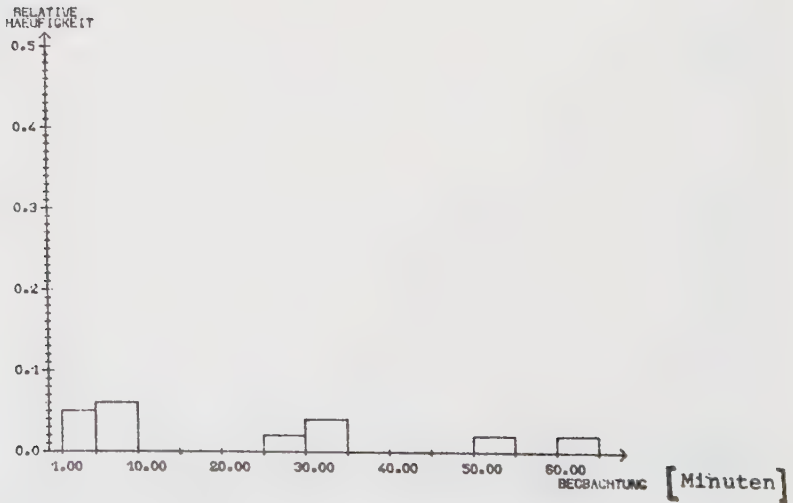


Abb. 3.2.3.2.1 - 12: Niere/Urogramm-Untersuchung in A2

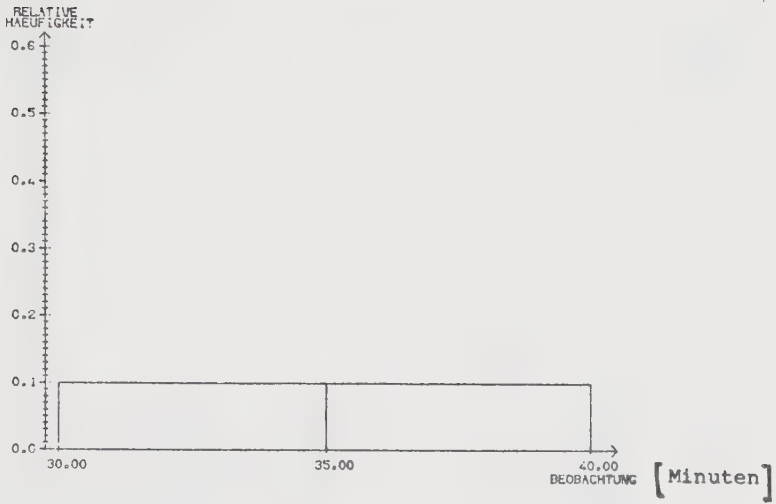


Abb. 3.2.3.2.1 - 13: Lungenschicht-Untersuchung in A2

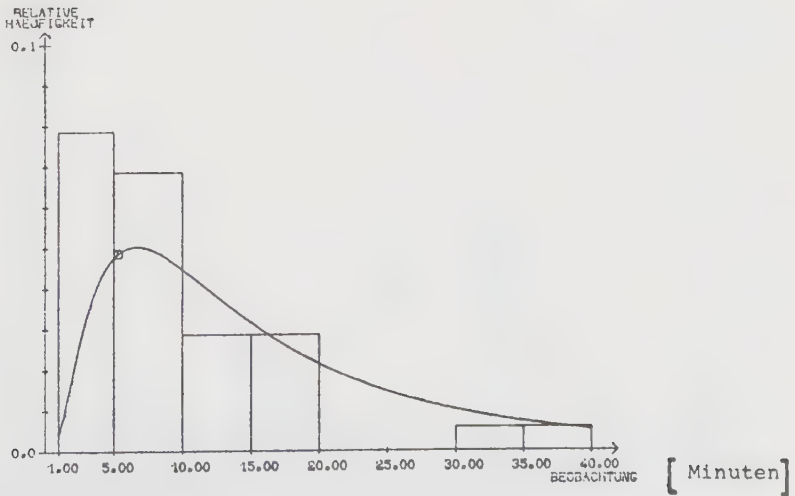


Abb. 3.2.3.2.1 - 14: Knochen-Untersuchung in A3

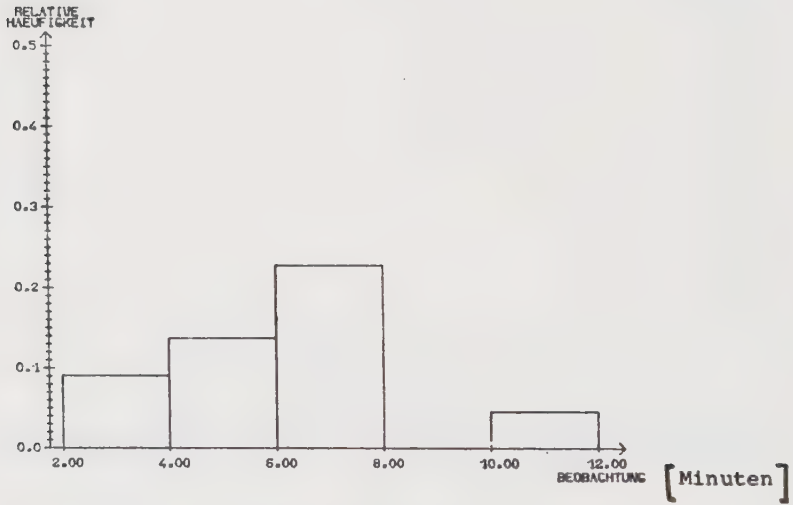


Abb. 3.2.3.2.1 - 15: NNH-Untersuchung in A3

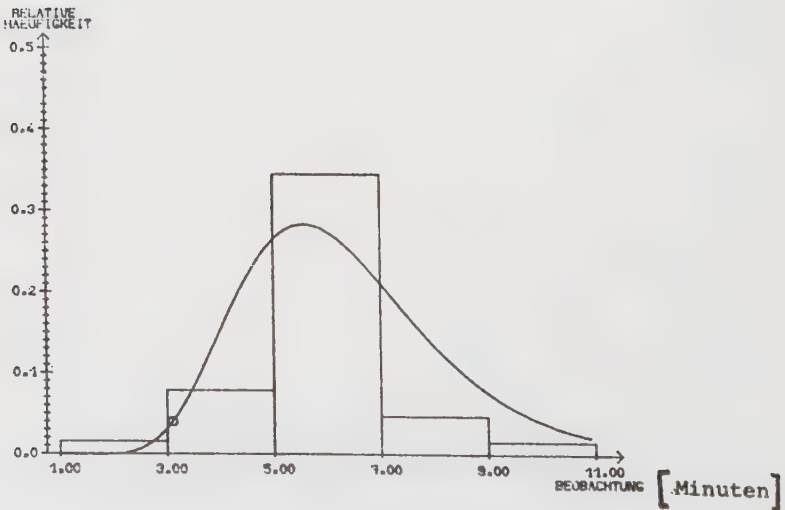


Abb. 3.2.3.2.1 - 16: Gallen-Untersuchung in A3

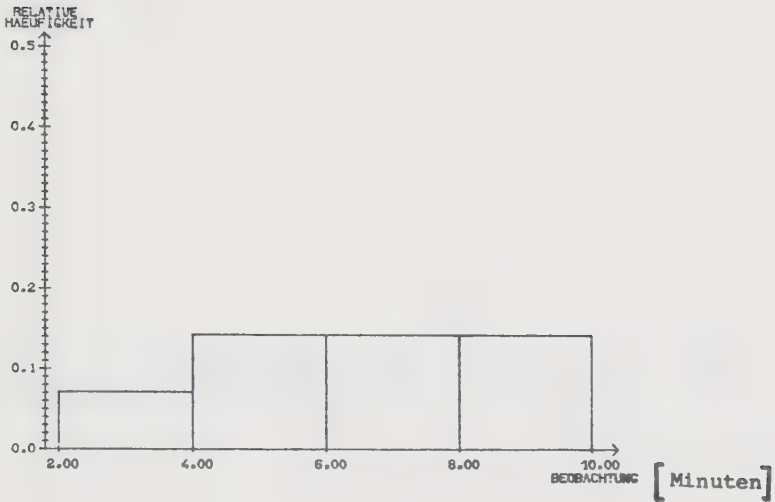


Abb. 3.2.3.2.1 - 17: Pankreas-Untersuchung in A3

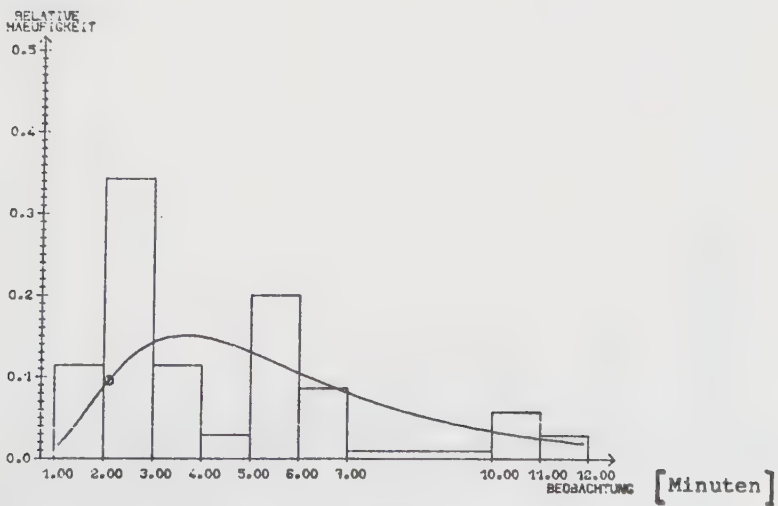


Abb. 3.2.3.2.1 - 18: Rüstzeit Niere/Urogramm

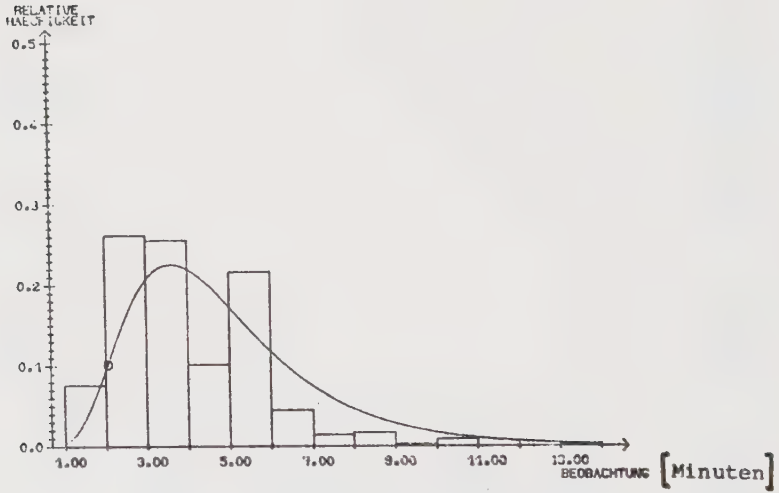


Abb. 3.2.3.2.1 - 19: Thorax-Befundung

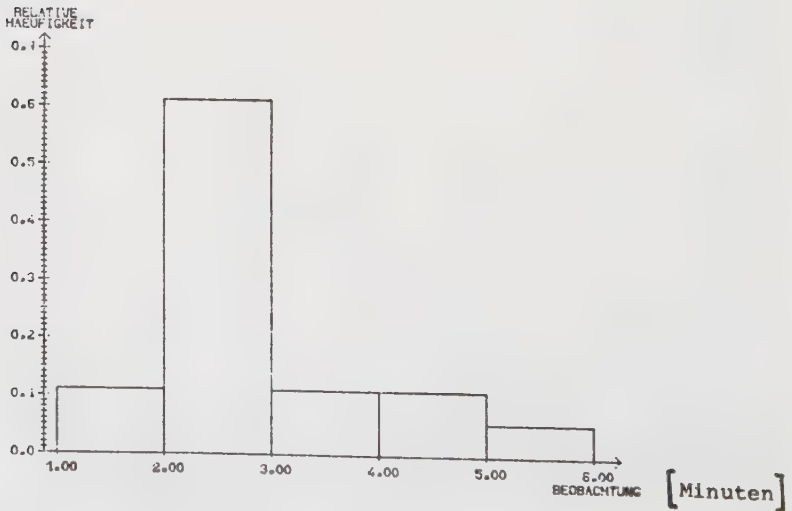


Abb. 3.2.3.2.1 - 20: Trachea-Befundung

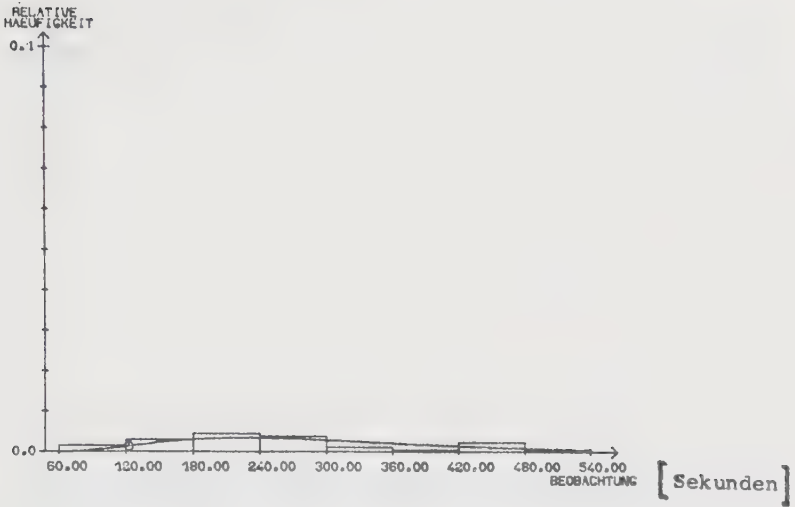


Abb. 3.2.3.2.1 - 21: Niere/Urogramm-Befundung

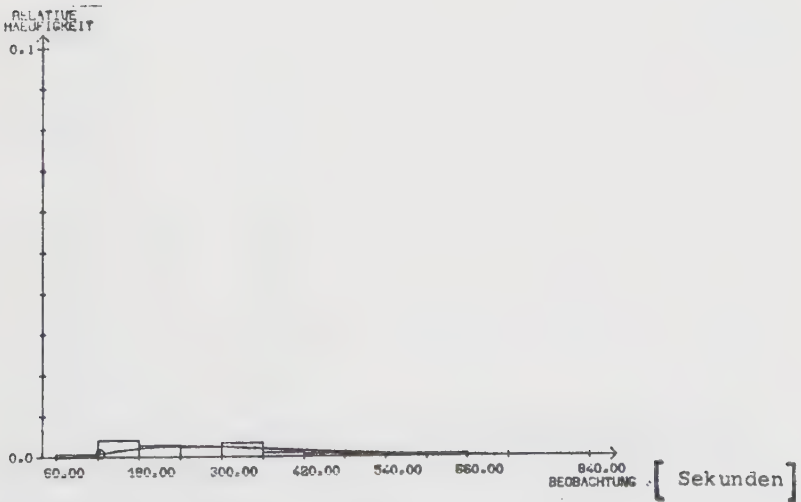


Abb. 3.2.3.2.1 - 22: Knochen-Befundung

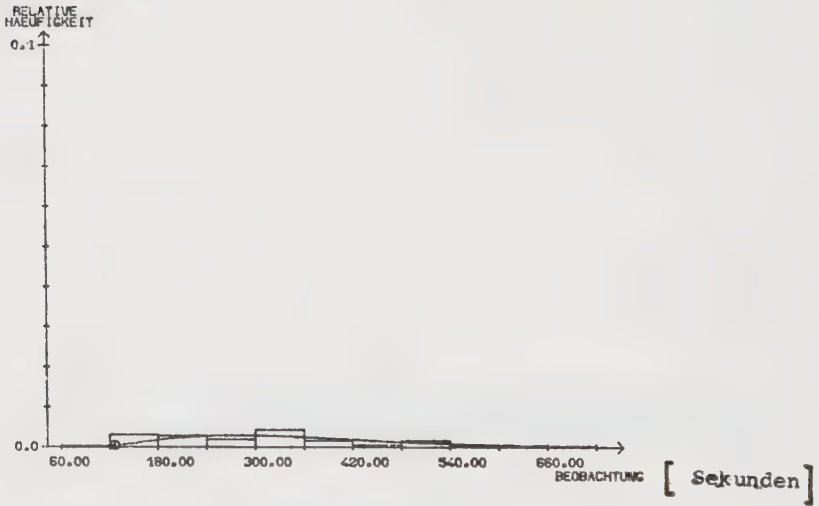


Abb. 3.2.3.2.1 - 23: MDP-Befundung

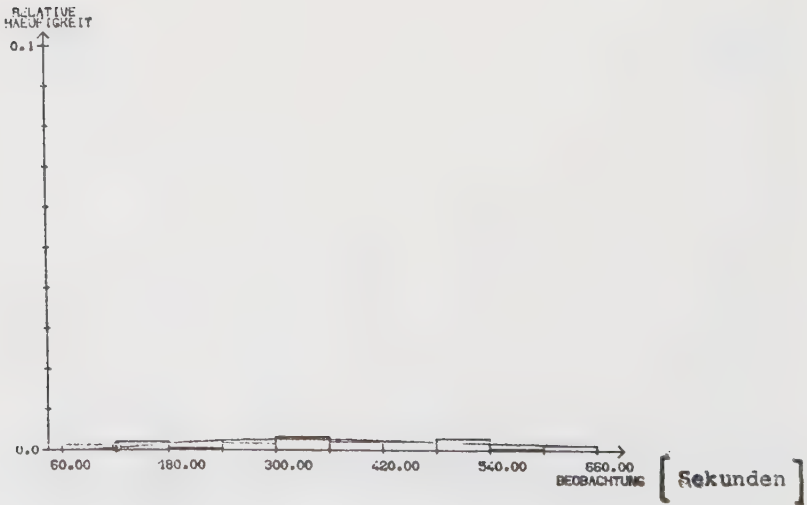


Abb. 3.2.3.2.1 - 24: Colon-Befundung

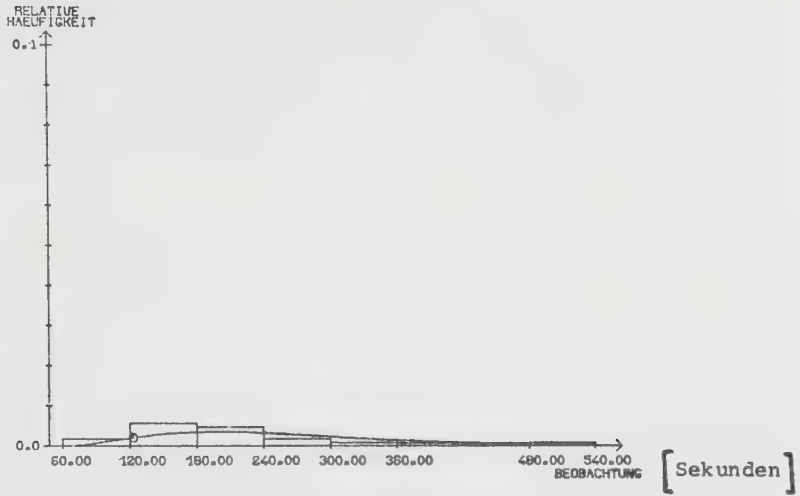


Abb. 3.2.3.2.1 - 25: Galle-Befundung

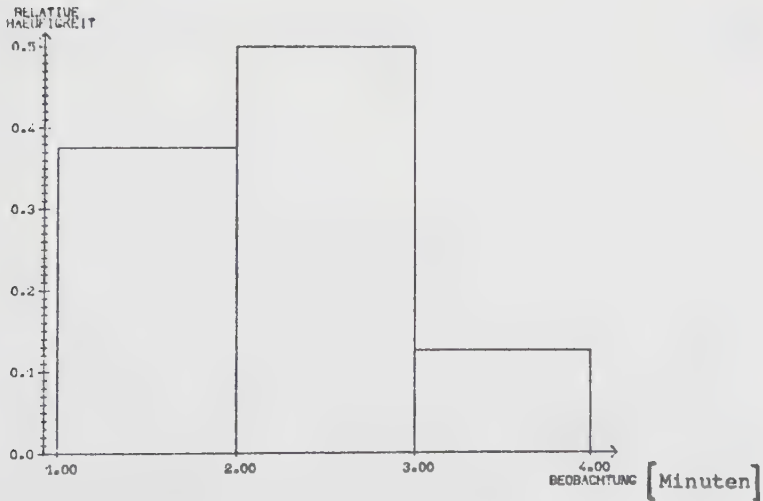


Abb. 3.2.3.2.1 - 26: Pankreas-Befundung

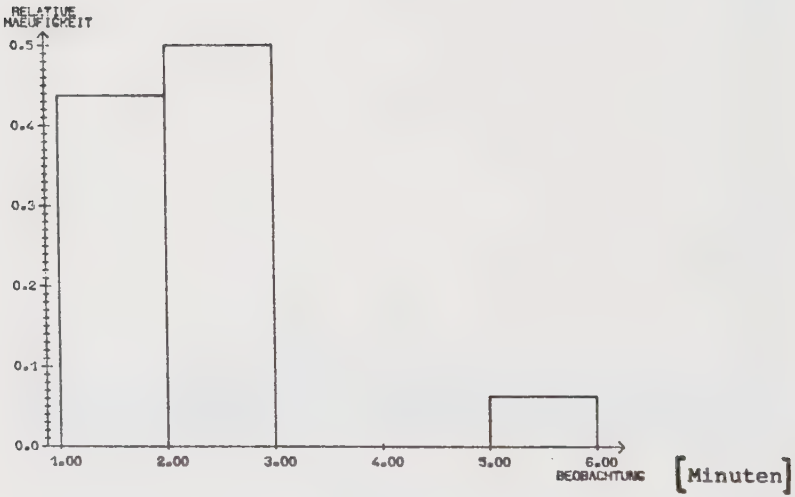


Abb. 3.2.3.2.1 - 27: Abdomen-Befundung

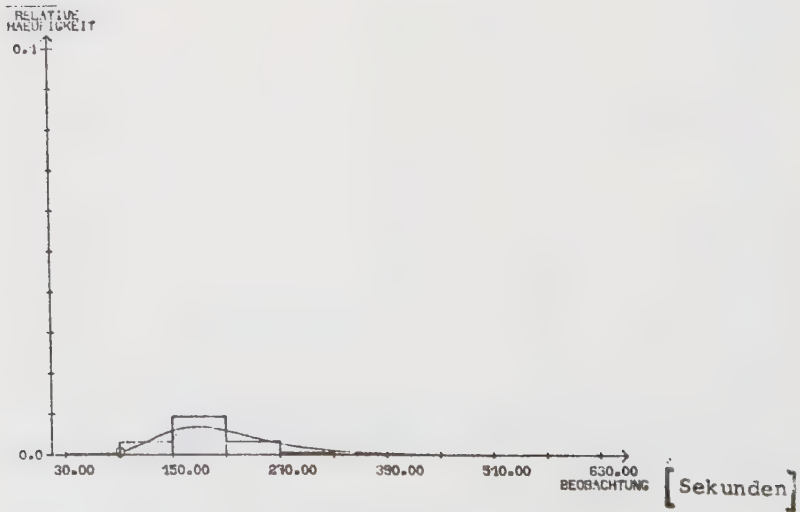


Abb. 3.2.3.2.1 - 28: Befundschreiben

Die Abb. 3.2.3.2.1 - 1 bis 3.2.3.2.1 - 28 geben die Verteilungsdichten der im Modell verwendeten Tätigkeitsdauern wieder. Sie beziehen sich auf die im Routinebetrieb in den einzelnen Räumen ausgeführten Tätigkeiten. Die Parameter der logarithmischen Normalverteilungen sind weggelassen. Die Pharmakardiographieuntersuchungen sind ebenfalls nicht eigens dargestellt. Ihre Dauer beträgt zwei Minuten mehr als die der MDP-Untersuchungen.

Die Histogramme stellen jeweils die ermittelten Verteilungsdichten dar. Die glatten Kurven sind die Approximationen der entsprechenden Tätigkeitsdauerverteilungen.

In Tabelle 3.2.3.2.1 - 1 sind für die einzelnen Tätigkeitsdauern der Stichprobenumfang und die errechnete Sicherheitswahrscheinlichkeit P% des χ^2 -Tests angegeben.¹⁾

Unter der Sicherheitswahrscheinlichkeit ist das P% Fraktile der χ^2 -Verteilung zu verstehen. Aus dieser Tabelle ist zu entnehmen, daß in der Regel die logarithmische Normalverteilung eine gute Annäherung an die empirischen Verteilungen darstellt. Andere Verteilungen, wie Erlang- und Normalverteilung, erbrachten signifikant schlechtere Ergebnisse.

Auch diejenigen Tätigkeiten, die wegen des zu geringen Stichprobenumfanges nicht getestet werden konnten, sind mit einiger Sicherheit logarithmisch-normalverteilt.

Eine Ausnahme stellt lediglich das Befundschreiben dar. Das schlechte Ergebnis dieses Tests ist allerdings leicht erklärlich. Die gemessenen Zeiten für diese Tätigkeit liegen in einem Bereich zwischen einer und sieben Minuten. Davon fallen aber allein ca. zwei Drittel aller Tätigkeitsdauern in das Intervall 1 - 3 Minuten. Da jedoch die Schreibkräfte die exakten Tätigkeitsdauern jeweils in 1-Minuten-Klassen einordneten, ergab sich letztlich eine nicht mehr korrigierbare, zu grobe Klasseneinteilung, die die Verteilung verfälschte. Ähnliches gilt für die Tätigkeiten Thorax-A1, Thorax-Befundung, die eben-

1) Das Testprogramm stellte freundlicherweise Herr Dipl.-Kfm. W. Schläger zur Verfügung.

Tätigkeitsdauern	Stichproben- umfang	errechnete Sicherheits- wahrscheinlichkeit P%
MDP - D1, D2	46	96.17
Retropneu - D1, D2	- (Schätzver- teilung)	-
Colon - D1, D2	13	-
Bronchographie - D1, D2	- (Schätzver- teilung)	-
Angiographie - D1, D2	- (Schätzver- teilung)	-
Abdomen - D1, D2	2	-
Galle - D1, D2	13	-
Lymphographie - D1, D2	- (Schätzver- teilung)	-
Phleporaphie - D1, D2	- (Schätzver- teilung)	-
Thorax - A1	220	99.00 $\leq$ P% $\leq$ 100.00
Trachea - A1	13	-
Niere, Urogramm - A2	10	-
Lungenschicht - A2	2	-
Knochen - A3	34	63.57
NNH - A3	11	-
Galle - A3	28	95.00 $\leq$ P% $\leq$ 97.5
Pankreas - A3	7	-
Rüstzeit	35	98.38
Thorax - Befundung	356	99.00 $\leq$ P% $\leq$ 100.00
Trachea - Befundung	18	-
Niere, Urogramm - Bef.	45	74.10
Knochen - Befundung	70	80.33
MDP - Befundung	71	98.25
Colon - Befundung	42	99.00 $\leq$ P% $\leq$ 100.00
Galle - Befundung	39	56.72
Pankreas - Befundung	8	-
Abdomen - Befundung	16	-
NNH - Befundung	21	-
Angiographie - Bef.	7	-
Befundungsschreiben	774	100.00

Tab. 3.2.3.2.1 - 1: Testergebnisse für die Tätigkeitsdauern

falls sehr kurze Dauern aufweisen, aber ~~gleichfalls~~ in 1-Minuten-Klassen eingeordnet wurden. War die Mitarbeit zur Gewinnung der vorliegenden Daten schon gering, wäre eine erneute Meßserie jedoch keinesfalls vom Personal akzeptiert worden. Daher wurden die vorliegenden Verteilungen im Modell verwendet. Für einige wenige Tätigkeiten wurde mit Mittelwerten gerechnet, z.B. Telefonieren. Sie sind hier nicht mehr aufgeführt.

3.2.3.2.2 Materialverbrauch

Eine zur Bestimmung der Verteilungen von Tätigkeitsdauern analoge Vorgehensweise wurde für die Verteilungen der Filmverbräuche verwendet. Hier lagen keine Daten vor, so daß auf die Schätzungen des Personals zurückgegriffen werden mußte. Da überdies nicht von einer Gleichverteilung des Filmverbrauchs je Untersuchung ausgegangen werden konnte, wurde als gemeinsame Verteilung die logarithmische Normalverteilung festgelegt. Damit konnten aus den Schätzungen für den minimalen bzw. maximalen Filmverbrauch pro Untersuchungsart - wie oben beschrieben - die Parameter $\log f$ und σ errechnet werden. Im Modell werden dann aus diesen Verteilungen Stichproben gezogen, die den aktuellen Materialverbrauch simulieren. Diese Schätzwerte MIN und MAX sind Tab. 3.2.3.2.2. - 1 zu entnehmen.

Bei einer Thoraxuntersuchung können nur ein oder zwei belichtete Filme vorkommen. Die entsprechend geschätzten Wahrscheinlichkeiten p hierfür sind in der Tabelle angegeben.

3.2.3.2.3 Anforderungsanfall

Im folgenden sollen nun noch einige Ergebnisse der Datenerhebung bezüglich des Anforderungsanfalles erläutert werden.

Jeder der 18 Untersuchungsarten wurde pro Wochentag eine eigene Zufallsvariable zugeordnet. Es ergeben sich also 126 Verteilungen.

Untersuchungsart	MIN	MAX
Thorax	$p(1) = 0.333$	$p(2) = 0.666$
Trachea	1	1
Niere, Urogramm	3	8
Retropneu	6	8
Bronchographie	8	12
Knochen	2	20
MDP	3	20
Colon	5	10
Galle	2	8
Pankreas	2	2
Abdomen	1	2
NNH	1	2
Angiographie	10	30
Lungenschicht	4	12
Phleporaphie	2	10
Lymphographie	0	5
Pharmakardiographie	3	20

Tab. 3.2.3.2.2 - 1: Schätzwerte zur Bestimmung der Zahl der belichteten Filme pro Patient und Untersuchungsart

Diese Verteilungen werden durch Normalverteilungen approximiert. Diese Annahme konnte nicht mit genügender Sicherheit empirisch untermauert werden, da das Datenmaterial, obwohl die Anforderungen eines ganzen Jahres ausgewertet werden, zu gering war.

Faßt man jedoch den Anforderungsanfall pro Untersuchungsart eines Tages ohne Unterscheidung der einzelnen Wochentage zusammen, ergeben sich mit guter Näherung Normalverteilungen.

Es konnte daher davon ausgegangen werden, daß auch für jeden Wochentag beidseitig gestutzte Normalverteilungen gültig sind.

Die Parameter Mittelwert und Standardabweichung sind in Tab. 3.2.3.2.3 - 1 aufgeführt. Die minimalen und maximalen Ausprä-

gungen der Verteilungen zeigt Tab. 3.2.3.2.3 - 2. Die Verteilungen schließen auch Feiertage an Werktagen mit ein. Im Modell wurden sie nicht eigens berücksichtigt, obwohl der Anforderungsfall dann etwa dem an Sonntagen entspricht. Bei einigen Untersuchungen, die im Jahr 1973 nur sehr selten auftraten, wurde eine Gleichverteilung angesetzt.

Die nachstehenden Daten basieren auf einer Erhebung für das Jahr 1973. Sie werden für das Modell als stationär festgelegt.

Betrachtet man jedoch den gesamten Anforderungs- oder Patientenansturm der Röntgenabteilung pro Jahr über einige Jahre hinweg, so zeigt sich, daß diese Werte einer charakteristischen Zeitreihe folgen. Es folgt daraus, daß eine Abschätzung des zukünftigen Anforderungs- bzw. Patientenfalls notwendigfalls in das Modell eingebracht werden muß.

Abb. 3.2.3.2.3 - 1 zeigt die Zahl der geröntgten Patienten pro Jahr bis zum Jahr 1974 aufgrund der Statistik, die in der Röntgenabteilung geführt wurde (ausgezogene Linie). Der Wert für 1975 stellt eine Schätzung auf der Basis der bisherigen Zwischenergebnisse dar. Sieht man von dem außergewöhnlichen Rückgang der Patientenzahlen von 1965 ab, der sich durch klinikinterne Umstellungen erklären läßt, ist ein kontinuierlicher Anstieg zu verzeichnen. Die Jahre 1973 und 1974 bringen jedoch einen deutlichen Abfall. Der Grund ist im Erlass der Röntgenverordnung vom 1.1.73 zu suchen, der noch 1973 und dann verstärkt 1974 weniger untersuchte Patienten zur Folge hat. Die Röntgenverordnung hat grob gesagt zwei Ziele:

- Verstärkung des Strahlenschutzes für das Personal
- Senkung der Strahlenbelastung des Patienten auf das medizinische unumgängliche Mindestmaß

Das hatte die Konsequenz, daß die Zahl der Anforderungen pro Patientenaufenthalt im Krankenhaus zurückging. Gleichzeitig wurden erstmals in nennenswertem Umfang auch Aufnahmen, die außerhalb der Medizinischen Klinik angefertigt wurden, von den Röntgenologen der Röntgenabteilung befundet.

Anforderungsart	Mo		Di		Mi		Do		Fr		Sa		So	
	MEAN	SIGMA	MEAN	SIGMA	MEAN	SIGMA	MEAN	SIGMA	MEAN	SIGMA	MEAN	SIGMA	MEAN	SIGMA
1 Thorax	36.00	10.05	35.04	10.48	34.08	10.89	34.90	11.14	33.67	8.48	5.75	2.60	3.0	2.0
2 Trachea	2.77	1.00	0.98	1.09	0.85	0.92	1.13	1.12	0.88	0.92	0.02	0.14	0.0	0.0
3,4 Niere, Urogramm	8.33	4.63	7.17	4.75	6.92	4.15	7.23	3.72	6.63	3.80	0.04	0.28	0.0	0.0
5 Retropneue			Gleichverteilung		p = 0.026						-		-	
6 Bronchographie			Gleichverteilung		p = 0.023		Montag-Freitag				-		-	
7 Knochen	12.06	6.27	10.63	6.23	10.56	5.28	11.29	5.20	10.44	5.12	0.12	0.38	0.0	0.0
8 MDP	1.88	1.91	2.35	1.75	2.21	2.15	2.31	2.14	2.44	2.24	0.0	0.0	0.0	0.0
9 Colon	5.40	3.39	5.31	3.84	5.98	3.18	6.85	4.33	7.38	4.42	0.23	2.70	0.0	0.0
10 Galle	6.31	3.35	5.85	3.86	5.44	3.52	6.44	2.65	5.98	3.22	0.04	0.19	0.0	0.0
11 Pankreas	1.77	2.49	1.46	1.99	1.71	1.68	2.56	2.15	2.35	2.04	0.0	0.0	0.0	0.0
12 Abdomen	5.87	4.97	9.02	5.56	5.88	5.04	4.44	4.24	3.33	4.15	0.63	1.65	0.653	1.65
13 NNH	2.46	2.06	2.46	1.84	2.21	2.15	2.04	1.49	1.98	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0
14 Angiographie	0.08	0.27	0.33	0.55	0.25	0.52	0.06	0.31	0.02	0.14	0.0	0.0	0.0	0.0
15 Lungenschicht			jeder 10. Thorax											
16 Phleporaphie			Gleichverteilung		p = 0.023						-		-	
17 Lymphographie			Gleichverteilung		p = 0.02		Montag-Freitag				-		-	
18 Pharmakardiographie	6.65	3.52	5.79	3.32	6.23	3.55	6.94	3.20	6.46	3.28	0.0	0.0	0.0	0.0
MEAN = Mittelwert														
SIGMA = Standardabweichung														

Tab. 3.2.3.2.3 - 1: Mittelwerte und Standardabweichungen der Anforderungsarten pro Wochentag

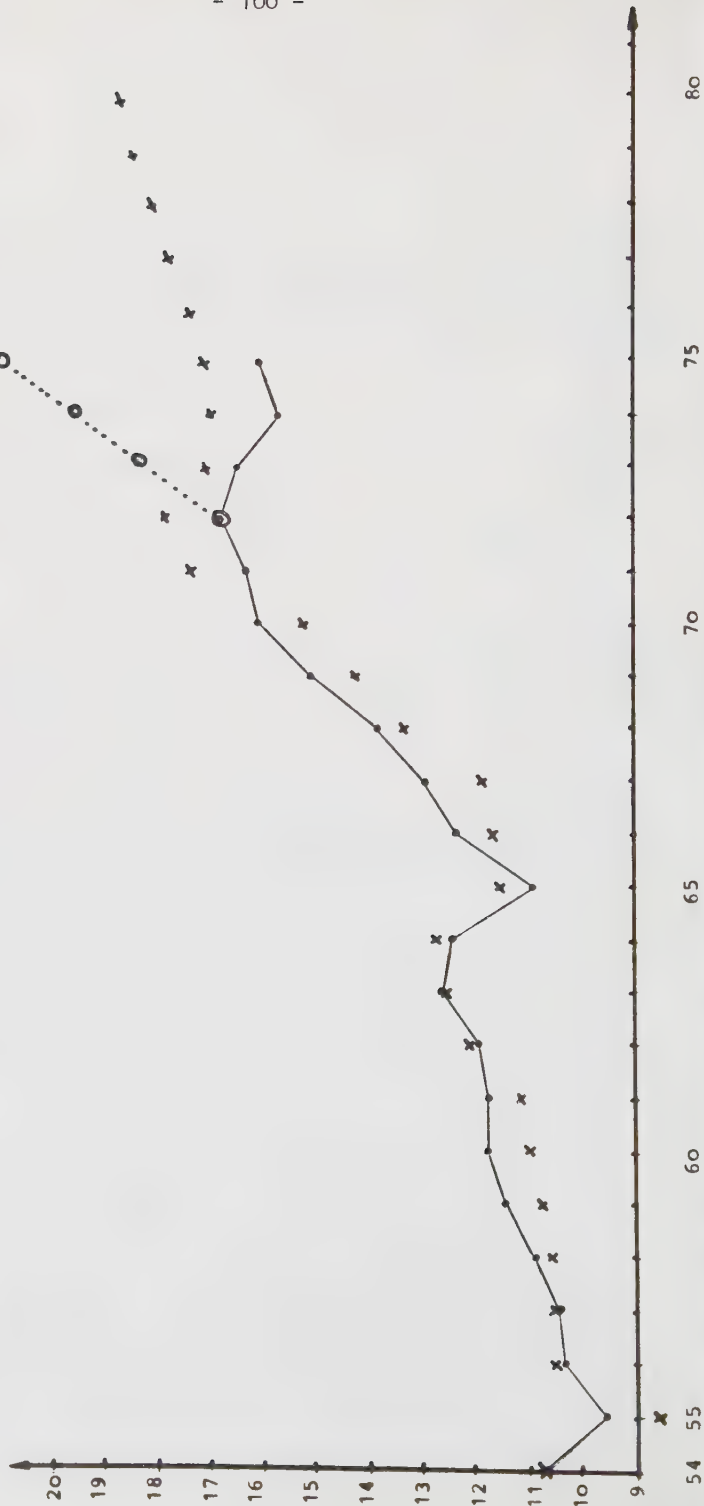
Anforderungsart	Max (Mo - Fr)	Min	MEAN mit Sonntag	Max Samstag	Min Sonntag	Max Sonntag	Min	MEAN ohne Wochenende
1 Thorax	53	5	26,06	11	0	5	0	34.738
2 Trachea	5	0	0.947	0	0	0	0	1.322
3,4 Niere, Urogramm	20	0	5.189	2	0	0	0	7.256
5 Retropneu	1	0	0.02	1	0	0	0	0.02
6 Bronchographie	1	0	0.02	0	0	0	0	0.02
7 Knochen	24	2	7.87	2	0	0	0	10.996
8 MDP	10	0	1.599	0	0	0	0	2.238
9 Colon	15	2	4.30	10	0	0	0	6.184
10 Galle	13	2	4.00	1	0	0	0	6.004
11 Pankreas	18	2	1.407	0	0	0	0	1.97
12 Abdomen	22	0	4.26	10	0	5	0	5.708
13 NNH	9	0	2.3	0	0	0	0	2.23
14 Angiographie	1	0	0.106	0	0	0	0	0.148
15 Lungenschicht	5	0	jeder 10. Thorax			0	0	-
16 Phleporaphie	1	0	0.02	0	0	0	0	0.02
17 Lymphographie	1	0	0.02	0	0	0	0	0.02
18 Pharmakardiographie	16	2	4.14	0	0	0	0	6.402
Gesamt	215	15	62.258	37	0	10	0	85.276

MEAN = Mittelwert

SIGMA = Standardabweichung

Tab. 3.2.3.2.3 - 2: Kleinste und größte Ausprägungen für alle Anforderungsarten

Untersuchte
Patienten = 1000



Von großem Interesse ist nun die zukünftige Entwicklung der Zahl der Röntgen-Patienten. Wie noch aufgezeigt werden soll, ist dieses Problem nicht identisch mit der Frage nach der Zahl der überhaupt zu behandelnden Patienten.

Es gab nun - teilweise vor Erlass der Röntgenverordnung - Schätzungen über die zukünftigen Patientenzahlen. Die Meinungen waren wohl einhellig auf ein weiteres starkes Anwachsen ausgerichtet. So wurde beispielsweise eine jährliche 7%ige Zunahme unterstellt.¹⁾

Abb. 3.2.3.2.3 - 1 zeigt diese Anforderungsentwicklung vom Jahre 1972 an als gepunktete Kurve. Schon 1975 wäre danach die 20.000-Patienten-Grenze überschritten worden. Der wahre Wert für 1975 liegt aber unter dem Wert für 1973. Dies bedeutet eine Differenz von ca. 25 %. Es ist klar, daß etwaige Konsequenzen aus der 7%-Schätzung in Form von Erweiterungen von Röntgenabteilungen zu Überkapazitäten geführt hätten.

Will man dennoch eine Aussage über die künftige Entwicklung treffen, so bietet sich eines der bekannten Prognoseverfahren an. Verwendet wurde hier ein Verfahren, das eine iterative Regressionsanalyse²⁾ zur Schätzung einer Zeitreihe. Es wurde ein quadratischer Ansatz der Regressionsgleichung eingeführt:

$$(3.2.3.2.3 - 1) \quad y = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$$

Die Koeffizienten a_0 , a_1 , a_2 werden nach der Maximum-Likelihood-Methode bestimmt.

Es ist t die auf der Abszisse aufgetragene Variable und y der Funktionswert, in diesem Fall die Zahl der geröntgten Patienten pro Jahr.

Ferner werden Werte der fernereren Vergangenheit weniger stark berücksichtigt als unmittelbar vorausgehende Werte.

Das entsprechende Rechenprogramm liefert für die Zeitreihe des

1) Tasto (1973), S. 199.

2) Matt (o.J.).

Anforderungsfalles, die in Abb. 3.2.3.2.3. - 1 durch Kreuze gekennzeichneten Punktreihen bis 1981. Dabei wird der Anforderungsabfall der Jahre 1973, 1974, 1975 etwas geglättet und in einen linearen Anstieg bis 1981 übergeführt. Diese Prognose stimmt tendenziell mit den Schätzungen der Röntgenologen der Röntgenabteilung überein. Als Konsequenz ergibt sich daraus, daß eine apparative und räumliche Erweiterung der Röntgenabteilung auch in Zukunft nicht notwendig ist, wenn der Arbeitsablauf nur effektiv genug gestaltet wird. Allerdings ist die Kenntnis des Patientenanzahls nur von bedingter Aussagekraft. Denn ein Patient wird unter Umständen mehrmals geröntgt, d.h. es entstehen mehrere Anforderungen pro Patient. Jede dieser Anforderungen kann sich wiederum aus mehreren Einzelleistungen zusammensetzen.

Saisonale Schwankungen des Anforderungsanzahls wurden nicht analysiert. Eine Untersuchung dieser Schwankungen könnte als Grundlage für eine Urlaubsplanung für das Personal, sowie eine Glättung der Kapazitätsauslastung der Röntgenabteilung dienen. Der relative Anforderungseingang (Röntgenhäufigkeit) nach Stationen bzw. Diagnosearten pro Tag nach dem n-ten Tag der Einlieferung des Patienten für das Jahr 1972 wurde von Kohlschreiber ermittelt.

Die Abb. 3.2.3.2.3 - 3 bis 3.2.3.2.3 - 5 wurden dort entnommen.¹⁾ Es ist jeweils die Zahl der untersuchten Patienten pro Tag nach Diagnosearten aufgetragen.

Die Diagnosearten sind nach dem Immich-Schlüssel kodiert.

Tab. 3.2.3.2.3 - 6 zeigt die ersten beiden Ziffern von links des Immich-Schlüssels, der der Topographie des menschlichen Körpers 5-stelligen Zahlen zuordnet. Die hier verwendeten 2-stelligen Zahlen (gröbere Topographie) entsprechen den Diagnosegruppen in der Arbeit von Kohlschreiber. Es sei noch darauf hingewiesen, daß diese Art der Codierung nichts mit der willkürlichen Zuordnung von ganzen Zahlen zu den Anforderungsarten (siehe oben) zu tun hat.

1) Kohlschreiber (1974), Blatt 88 ff.

ERSTE ROENTGENUNTERSUCHUNG DER PATIENTEN

FAKTE	00	01	02	03	04	05	DIAGNOSE N					10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
(A)							06	07	08	09											
1	31.4	35.3	7.1	25.2	23.5								18.1	17.3	11.6	50.0		75.0	52.9		
2	43.9	48.4	52.5	29.4	25.3								60.7	57.1	65.2	50.0		12.5	40.0	85.7	
3	5.9	7.9	12.5	5.9	17.5								6.3	14.3	2.0						
4	8.6	7.3	12.5	17.6	17.5								4.2	14.3	17.7		50.0		2.9	14.3	
5	2.6	3.1	1.8	5.9	20.0								2.8		1.5		53.0				
6	2	1.6	1.8	5.9	20.0										.5				1.4		
7	2	1.8			5.9										.5						
8	2																	12.5			
9	2				20.0										.5						
10	1.7												1.4		.5				1.4		
11																					
12																					
13																					
14																					
15																					
16																					
17																					
18																					
19																					
20																					
21																					
22																					
23																					
24																					
25																					
26																					
27																					
28																					
29																					
30																					
31																					
32																					
33																					
34																					
35																					
36																					
37																					
38																					
39																					
40																					
41																					
42																					
43																					
44																					
45																					

3

HAEFIGKEIT DER ROENTGENUNTERSUCHUNGEN AM N-ten TAG NACH DIAGNOSTN (IN P R O Z E N T)

E R S T E R O E N T G E N U N T E R S U C H U N G D E R P A T I E N T E N

TAGE	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
(N)																				
1																				
2																				
3																				
4																				
5																				
6																				
7																				
8																				
9																				
10																				
11																				
12																				
13																				
14																				
15																				
16																				
17																				
18																				
19																				
20																				
21																				
22																				
23																				
24																				
25																				
26																				
27																				
28																				
29																				
30																				
31																				
32																				
33																				
34																				
35																				
36																				
37																				
38																				
39																				

25.0

16.7

ERSTE RÖNTGENUNTERSUCHUNG DER PATIENTEN

Tabelle	(N)	O I A G N O S E N																D I A G N O S E N			
		40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
1	100.0	100.0	66.7	100.0	10.3	50.0	15.2	16.7	33.3	33.3	33.3	34.9	50.6	47.4	46.7	52.1	65.0	26.7	50.0	41.7	
2					69.0	60.0	25.0	75.8	66.7	33.3	46.2	32.1	36.8	30.9	46.7	30.9	25.0	60.0	50.0	41.7	
3					5.2	23.0	3.0	3.0	5.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
4					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
5					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
6					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
7					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
8					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
9					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
10					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
11					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
12					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
13					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
14					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
15					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
16					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
17					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
18					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
19					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
20					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
21					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
22					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
23					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
24					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
25					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
26					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
27					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
28					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
29					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
30					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
31					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
32					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
33					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
34					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
35					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
36					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
37					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
38					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
39					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
40					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
41					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
42					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
43					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
44					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
45					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
46					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
47					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
48					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	
49					11.2	33.3	3.0	3.0	16.7	33.3	10.4	3.7	10.5	5.3	6.7	6.7	10.0	5.7	5.3	11.7	

HAUEFIGKEIT DER ROENTGENUNTERSUCHUNGEN AM N-TEN TAG NACH DIAGNOSEN (IN P R O Z E N T)

E R S T E ROENTGENUNTERSUCHUNG DER PATIENTEN

PAGE *		D I A G N O S E N																			
(N) *		60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
1 *	23.2	11.4	16.7	11.7	6.1	4.3	16.2	12.1	13.2				21.8	19.0	11.1		5.4	16.7			
2 *	66.7	54.3	50.0	53.6	57.6	64.8	52.2	57.6	59.9	50.0	50.0	50.0	56.4	61.9	55.6	100.0	54.1	50.0	33.3		100.0
3 *		5.7		10.2	5.1	6.3	5.7	11.1	5.4				7.7	9.5	11.1		10.9				
4 *		17.1		11.4	13.2	13.3	7.0	12.1	12.8				7.7	9.5	11.1		27.0	16.7			
5 *		2.9		2.7	1.0	2.7	1.9	1.0	.8			50.0									
6 *		2.9		2.1	2.0	1.6	1.9	1.0	1.2				3.8								
7 *			16.7	.6	3.0	1.2	.5	1.0	.8	20.0			1.3						33.3		
8 *		2.9		.9	1.0	.4	.5	1.0	1.2								2.7				
9 *				2.0					1.2												
10 *				16.7					1.0												
11 *					.3	1.0	.8	.5					1.3					10.7			
12 *								.5													
13 *						1.0	.4														
14 *					.3										11.1						
15 *								.5													
16 *								.5													
17 *								1.0													
18 *							.4														
19 *																					
20 *																					
21 *																					
22 *																					
23 *								1.0													
24 *								.5													
25 *			2.9																		
26 *									.4												
27 *																					
28 *																					
29 *																					
30 *																					
31 *																					
32 *																					
33 *																					
34 *																					
35 *																					
36 *																					
37 *																					
38 *																					
39 *																					
40 *																					
41 *																					
42 *																					
43 *																					
44 *																					
45 *																					
46 *																					
47 *																					
48 *																					
49 *																					

[illegible]

Tab. 3.2.3.2.3 - 4: Fortsetzung

HAUEFIGKEIT DER ROENTGENUNTERSUCHUNGEN AM N-TEN TAG NACH DIAGNOSEN (I N P R O Z E N T)
Z W E I T E ROENTGENUNTERSUCHUNG DER PATIENTEN

YAGE *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
(N) *																				
1																				
2																				
3																				
4																				
5																				
6																				
7																				
8																				
9																				
10																				
11																				
12																				
13																				
14																				
15																				
16																				
17																				
18																				
19																				
20																				
21																				
22																				
23																				
24																				
25																				
26																				
27																				
28																				
29																				
30																				
31																				
32																				
33																				
34																				
35																				
36																				
37																				
38																				
39																				
40																				
41																				
42																				
43																				
44																				
45																				
46																				
47																				
48																				
49																				

Z W E I T E ROENTGENUNTERSUCHUNG DER PATIENTEN

TAGE *	60	61	62	63	64	65	Ü A G N O S E M							71	72	73	74	75	76	77	78	79
(*)	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	79	
1 *																						
2 *																						
3 *	3.8	34.6		1.4	3.3	1.6	1.4	1.2	3.5			3.7				4.2						
4 *	34.6	34.6		34.7	18.3	26.4	25.1	25.8	26.6	56.7	100.0	16.7	33.3	28.6		3.3	66.7					
5 *	7.7	7.7		12.4	6.7	13.5	14.5	13.4	15.1			15.1		14.3		12.5						
6 *	13.1	13.1		15.3	15.0	19.7	19.6	20.7	19.7			13.0	13.3	14.3		20.8						
7 *	11.5	11.5		8.6	13.3	15.6	12.0	12.2	8.7			7.4	40.0	14.3		31.3						
8 *	3.9	3.9		4.0	6.7	8.8	9.0	9.8	4.6			14.6				8.3						
9 *	11.5	11.5		5.4	13.3	5.2	2.9	6.1	5.2			11.1	6.7	28.6	100.0	8.3						
10 *	100.0			1.8	3.3	5.7	2.7	2.4	2.3			9.3										
11 *				1.8	3.3	5.7	2.2	2.4	5.2			1.9	6.7									
12 *		3.8		3.3		.5		1.2	1.7			1.9				4.2						
13 *				3.3																		
14 *				1.4		2.1	2.9		1.2													
15 *				1.4		.5			.6													
16 *				.9		.5			1.2													
17 *							1.4		.6	33.3												
18 *						1.7	.7		.6													
19 *				.5																		
20 *							.7		1.2													
21 *							.7															
22 *																						
23 *																						
24 *									1.2													
25 *																						
26 *									.6													
27 *				.5			.7															
28 *					1.7																	
29 *							.7		1.2													
30 *							.7															
31 *																						
32 *																						
33 *																						
34 *																						
35 *																						
36 *																						
37 *																						
38 *																						
39 *																						
40 *																						
41 *																						
42 *																						
43 *																						
44 *																						
45 *																						
46 *																						
47 *																						
48 *																						
49 *																						

HAUFIGKEIT DER ROENTGENUNTERSUCHUNGEN AM N-ten TAG NACH DIAGNOSEN (IN PROZENT)

Z W E I T E R O E N T G E N U N T E R S U C H U N G D E R P A T I E N T E N

TAG	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
1																				
2																				
3																				
4																				
5																				
6																				
7																				
8																				
9																				
10																				
11																				
12																				
13																				
14																				
15																				
16																				
17																				
18																				
19																				
20																				
21																				
22																				
23																				
24																				
25																				
26																				
27																				
28																				
29																				
30																				
31																				
32																				
33																				
34																				
35																				
36																				
37																				
38																				
39																				
40																				
41																				
42																				
43																				
44																				
45																				
46																				
47																				
48																				
49																				

[illegible]

Tab. 3.2.3.2.3 - 5:

HÄUFIGKEIT DER ROENTGENUNTERSUCHUNGEN AM N-ten TAG NACH DIAGNOSEN (IN P R O Z E N T)	
D R I T T E R O E N T G E N U N T E R S U C H U N G D E R P A T I E N T E N	
D I A G N O S E N	
TAGE (N)	20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39
1	
2	
3	
4	
5	150.0
6	
7	
8	
9	100.0
10	
11	
12	
13	50.0
14	50.0
15	
16	
17	
18	
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	100.0
28	
29	
30	
31	
32	
33	
34	
35	
36	
37	
38	
39	

100.0

100.0

100.0

50.0
50.0

100.0

ORITTE KOSTENTUNTERZUCHUNG DER PATIENTEN

	60	61	62	63	64	65	D I A G N O S E N										70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
							60	61	62	63	64	65	66	67	68	69										
1																										
2																										
3																										
4																										
5																										
6																										
7																										
8																										
9																										
10																										
11																										
12																										
13																										
14																										
15																										
16																										
17																										
18																										
19																										
20																										
21																										
22																										
23																										
24																										
25																										
26																										
27																										
28																										
29																										
30																										
31																										
32																										
33																										
34																										
35																										
36																										
37																										
38																										
39																										
40																										

HÄUFIGKEIT DER ROENTGENUNTERSUCHUNGEN AM N-TEN TAG NACH DIAGNOSEN (IN PROZENT)										
D R I T T E ROENTGENUNTERSUCHUNG DER PATIENTEN										
TAGE *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
(N) *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
1 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
2 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
3 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
4 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
5 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
6 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
7 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
8 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
9 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
10 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
11 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
12 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
13 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
14 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
15 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
16 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
17 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
18 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
19 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
20 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
21 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
22 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
23 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
24 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
25 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
26 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
27 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
28 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
29 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
30 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
31 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
32 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
33 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
34 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
35 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
36 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
37 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
38 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
39 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
40 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
41 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
42 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
43 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
44 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
45 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
46 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
47 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
48 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
49 *	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49

Topographie (1. und 2. Stelle von links)

00 Gesamtorganismus, Psyche	50 Bronchen
01 Gesamtorganismus, Psyche	51 Lunge
02 Gesamtorganismus, Psyche	52 Pleura
03 Gesamtorganismus, Psyche	53 Kreislauforgane als Ganzes
04 Haut und Anhangsgebilde	54 Herz als Ganzes
05 Haut und Anhangsgebilde	55 Endokard
06 Haut und Anhangsgebilde	56 Myokard
07 Haut und Anhangsgebilde	57 Perikard
08 Knochen als Ganzes	58 Koronararterie
09 Gelenke als Ganzes	59 Thymus
10 Muskeln, Sehnen als Ganzes	60 Bauch als Ganzes
11 Blutgefäße als Ganzes	61 Baucheingeweide als Ganzes
12 Lymphknoten, -bahnen als Ganzes	62 Magendarmtrakt als Ganzes
13 Blut, Blutbildende Organe	63 Magen und Duodenum
14 Nervensystem als Ganzes	64 Darm
15 Kopf, Schädelknochen	65 Appendix und Kolon
16 Hirnhaut, Hirnsinus	66 Leber
17 Gehirn	67 Gallenblase, Gallenwege
18 Hypophyse	68 Pankreas
19 Epiphyse	69 Milz
20 Hirnnerven	70 Harnorgane als Ganzes
21 Gesicht, Gesichtsknochen	71 Niere
22 Lid, Bindehaut, Tränenapparat	72 Nierenbecken und Ureter
23 Augenbulbus	73 Nebenniere
24 Hornhaut, Sklera und Uvea	74 Becken als Ganzes
25 Pupille, Linse, Retina	75 Rektum
26 Dioptrischer Apparat	76 Harnblase, Harnröhre
27 Atmungsorgane, obere Luftwege	77 Geschlechtsorgane als Ganzes
28 Nase	78 Äußeres männliches Genitale
29 Nasennebenhöhlen	79 Inneres männliches Genitale
30 Sprachwerkzeuge als Ganzes	80 Äußeres weibliches Genitale
31 Verdauungsorgane als Ganzes	81 Uterus
32 Mund	82 Adnexe
33 Zähne, Zahnhalteapparat	83 Gravider Uterus
34 Zunge	84 Fetus
35 Speicheldrüsen	85 Rücken als Ganzes
36 Gaumenmandel	86 Wirbelsäule
37 Rachen	87 Rückenmark
38 Äußeres Ohr	88 Extremitäten als Ganzes
39 Mittelohr	89 Schultergürtel
40 Innenohr	90 Arme
41 Hals als Ganzes	91 Schultergelenk und Oberarm
42 Kehlkopf	92 Ellenbogen und Unterarm
43 Schilddrüse	93 Handgelenk und Hand
44 Nebenschilddrüse	94 Finger
45 Trachea	95 Beine
46 Ösophagus	96 Hüftgelenk und Oberschenkel
47 Rumpf als Ganzes	97 Knie
48 Brustkorb als Ganzes	98 Unterschenkel und Sprunggelenk
49 Mamma, Mamille	99 Fuß und Zehen

Tab. 3.2.3.2.3 - 6: Immich-Schlüssel

Ferner ist eine Unterscheidung bezüglich der ersten, zweiten und dritten Röntgenuntersuchung eines Patienten getroffen worden.

Die Statistiken zeigen einige charakteristische Merkmale: Die Röntgenhäufigkeit ist je nach Diagnoseart starken Schwankungen unterworfen. Dies ist eine Folge der Tatsache, daß die Röntgendiagnostik nur für eine bestimmte Zahl von Krankheitsbildern Erfolg verspricht. Darüber hinaus beeinflussen sicherlich auch Gewohnheiten und die spezielle, apparative Ausstattung der Röntgenabteilung die diagnosespezifische Röntgenhäufigkeit.

Weiter ist zu beobachten, daß weitaus die meisten ersten Röntgenuntersuchungen in der Regel schon in den ersten Tagen des Krankenhausaufenthaltes vorgenommen werden. Es ist dies im Grunde eine Selbstverständlichkeit, da in der überwiegenden Zahl der Krankheiten eine schnelle Diagnose die Voraussetzung jeder Therapie ist. Im späteren Verlauf des Krankenhausaufenthaltes nimmt die Häufigkeit für eine erstmalige Röntgenuntersuchung allmählich ab. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der zweiten und dritten Röntgenuntersuchung. Hier ist die Häufigkeitsverteilung lediglich nach einem längeren Aufenthalt hin verschoben. Abb. 3.2.3.2.3 - 2 stellt als Beispiel den Verlauf der relativen Häufigkeit der ersten Colonuntersuchung nach dem n-ten Tag der Einlieferung eines Patienten graphisch dar.

Die in diesen Statistiken zum Ausdruck kommenden Informationen über die Röntgenhäufigkeit an bestimmten Tagen nach der Einlieferung könnten als weiteres Kriterium für den Einlieferungstermin dienen. Bisher werden überwiegend der Zustand des Patienten, sowie die Bettenkapazität als Bestimmungsgrößen benutzt. Ist jedoch die Kapazität der Röntgenabteilung ein Engpass, müßte auch deren Belastung durch ein bestimmtes Anforderungsprofil bei der Terminfindung berücksichtigt werden.

Wie schon erwähnt, ist der Anforderungsanfall pro Tag abso-

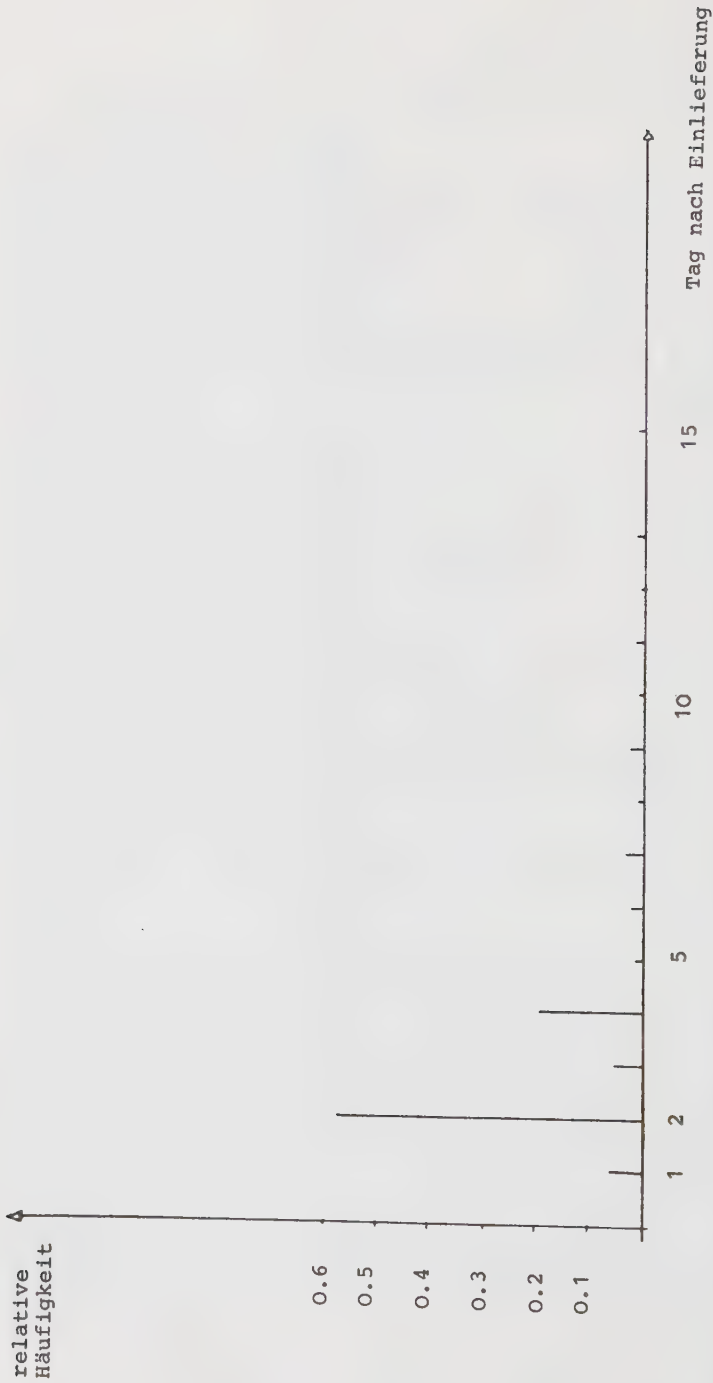


Abb. 3.2.3.2.3 - 2: Häufigkeit der ersten Colon-Untersuchung am n-ten Tag nach Einlieferung

lut und auch bezogen auf die bisherige Verweildauer des Patienten nur von bedingtem Informationswert, da sich eine Anforderung aus spezifischen Einzelleistungen zusammensetzt. Hähnchen gibt an, daß auf einen untersuchten Patienten acht spezifische Einzelleistungen treffen.¹⁾ Diese Zahl bezieht sich allerdings auf Krankenhäuser der Versorgungsstufe 1. Die Medizinische Klinik erreicht diesen Wert nicht.²⁾

Abb. 3.2.3.2.3 - 3 verdeutlicht, daß die maximale Zahl der Einzelleistungen pro Patient ca. sieben betrug. Der Abfall in den Jahren 1973 und 1974 ist wiederum ein Resultat der Röntgenverordnung.

Abb. 3.2.3.2.3 - 4 stellt graphisch den funktionalen Zusammenhang zwischen der Zahl der Patienten pro Jahr und der Zahl der spezifischen Einzelleistungen pro Jahr dar. Es besteht hier allem Anschein nach keine lineare Beziehung.

Ein weiteres Ergebnis betrifft das Verhältnis von Privat- und Kassenpatienten bezüglich ihrer Röntgenhäufigkeit.

Der Arbeit von Kohlschreiber ist zu entnehmen, daß die Zahl der in der Röntgenabteilung 1972 untersuchten Privatpatienten 1902 betrug, während 5261 Kassenpatienten geröntgt wurden. Dies ergibt ein Verhältnis Privatpatienten zu Kassenpatienten von ca. 0.36. Das Verhältnis der Bettenzahlen war jedoch ca. 0.17 (34/201). Ferner ist das Verhältnis Zahl der Privatpatienten zu Zahl der Kassenpatienten, die 1972 stationär behandelt wurden, ca. 0.20.

Daraus lassen sich drei Schlüsse ziehen:

Erstens ist das Verhältnis der Betten geringer als das der jeweils stationär behandelten Patienten. Dies bestätigen ebenfalls die empirischen Daten, die für die Privatstation

1) Hähnchen (1973), S. 277.

2) Unter einer spezifischen Einzelleistung wird jede einzelne Röntgenaufnahme und zusätzlich jede Sonderleistung wie z.B. Kontrasteinlauf verstanden. Dieser Begriff deckt sich nicht mit den oben definierten Begriffen Einzelleistung oder Leistungselement. Er stellt eine für Röntgenabteilungen spezifische Kennzahl dar.

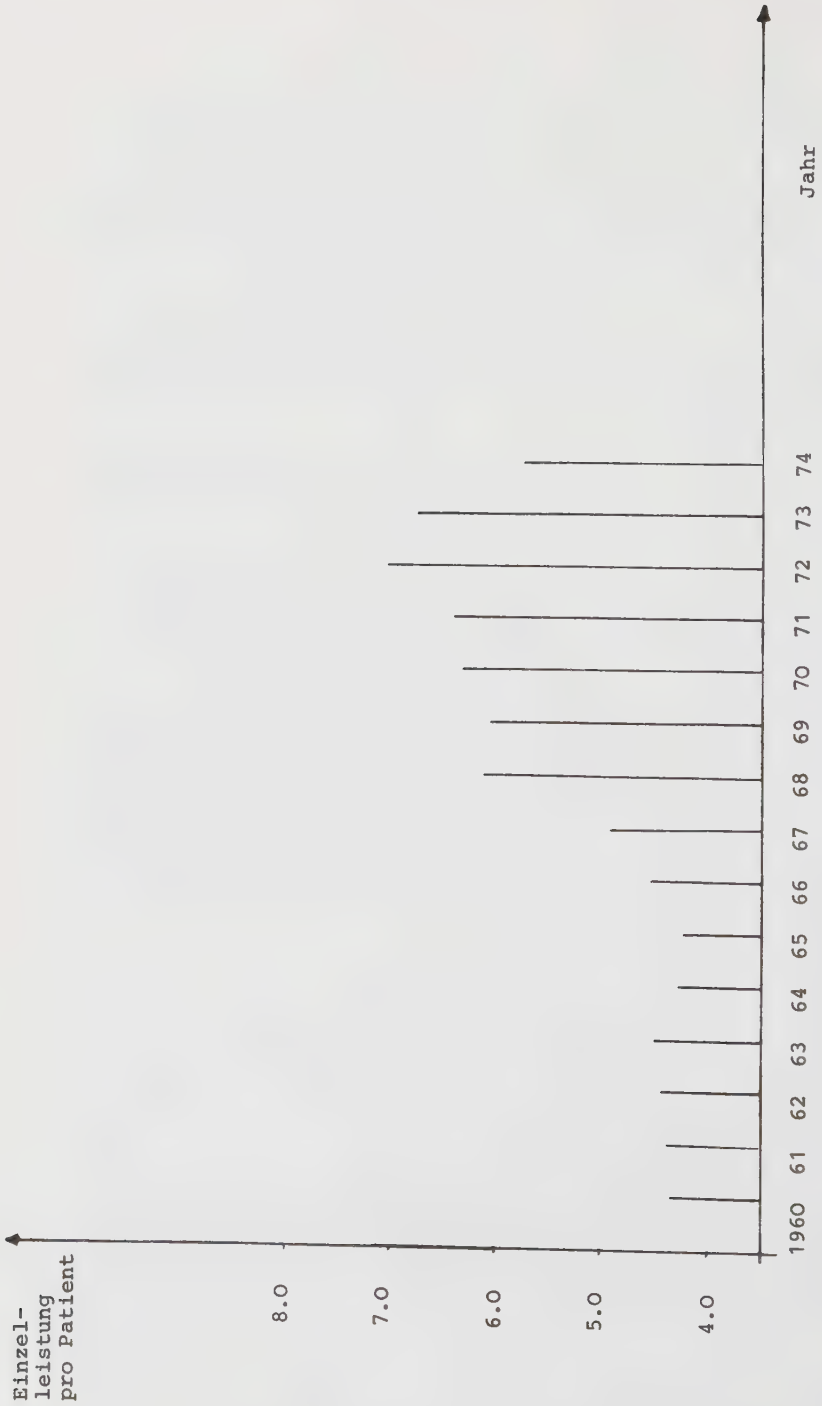


Abb. 3.2.3.2.3 - 3: Zeitliche Entwicklung der Zahl der Einzelleistungen pro Patient und Jahr

spezifische Leistungen

100

150

140

130

120

110

100

90

80

13

14

15

16

17

18

Patienten
x 1000

Abb. 3.2.3.2.3 - 4: Spezifische Einzelleistungen = $f(\text{Patienten})$

eine geringere Verweildauer der Patienten ergeben. Die Verteilungsparameter der Verweildauer der Station 32 der Medizinischen Klinik liegen mit den Werten $\mu = 9.27$ und $\sigma = 6.57$ deutlich unterhalb der übrigen Stationen.¹⁾ In der Konsequenz heißt das, daß diese Station einen größeren Durchsatz hat. (Hierbei wird für ein Zeitintervall für alle Stationen gleiche Auslastung vorausgesetzt).

Zweitens bedeutet der Unterschied der Verhältniszahlen Röntgenpatienten und stationär behandelte Patienten, daß im Zeitraum des Jahres 1972 die Privatpatienten häufiger einer Röntgenuntersuchung unterzogen wurden, als die Kassenpatienten.

Drittens läßt sich daraus schließen, daß die kürzere Verweildauer der Privatpatienten medizinisch deswegen möglich war, weil die Röntgendiagnostik intensiver genutzt wurde. Dazu kommt noch das gegenwärtige Erstattungsrecht, das einen hohen Privatpatientendurchsatz für das Krankenhaus attraktiv macht. Allerdings hat dieser erhöhte Durchsatz Auswirkungen auf die Kapazitätsauslastung der Röntgenabteilung. Sollte die Zahl der Privatpatienten in der Zukunft ansteigen, so würde dies eine überproportionale Belastung der Röntgenabteilung bedeuten.

3.2.4 Modellbeschreibung

3.2.4.1 Das Simulationsmodell

Die oben erläuterte Ablaufanalyse der Röntgenabteilung ließ nur den Schluß zu, daß zur Beantwortung der eingangs dieser Untersuchung im Abschnitt 3.2.1 aufgeführten Fragen allein ein Simulationsmodell möglich ist, da lediglich in diesem Fall eine hinreichend isomorphe Abbildung der komplexen Struktur gewährleistet ist.

Etwaige analytische Warteschlangenmodelle scheiden somit aus. Dennoch mußten auch im Simulationsmodell einige Abstriche be-

1) Kohlschreiber (1974), Blatt 61. Die Dimension der Werte ist [Tage].

züglich einer möglichst realitätsnahen Abbildung gemacht werden.

Einmal waren manche Tatbestände nicht hinreichend quantifizierbar, zum anderen mußte das Rechnermodell hinsichtlich seines Kernspeicherbedarfs auf der einen Seite und hinsichtlich der Rechenzeit auf der anderen Seite in Grenzen gehalten werden. Allerdings betreffen diese Vergröberungen der realen Struktur nicht wesentliche Merkmale des Arbeitsablaufes in der Röntgenabteilung. Eine weitere Darstellungsmöglichkeit hätte darin bestanden, sich grundsätzlich nur auf "Mittelwert"-Aussagen zu beschränken. Dies muß schon an der Fragestellung bezüglich der Kapazität der Röntgenabteilung scheitern, darüber hinaus weist New¹⁾ nach, daß man nicht davon ausgehen kann, daß im Laufe der Zeit sich die Schwankungen der Tätigkeitsdauer um Mittelwerte "ausgleichen". Ganz im Gegenteil wird der Fehler beim Durchfluß vieler Elemente durch ein derartiges System immer größer. Damit würden sich für den Fall der Röntgenabteilung, die einen mittleren Patientenfluß pro Tag von 85 Patienten hat, bei der Bestimmung von signifikanten Parametern wie Auslastung der Kapazität beträchtliche Fehler einstellen.

War die Entscheidung für ein Simulationsmodell aus diesen Gründen auch naheliegend, stellte sich jedoch noch die Frage nach der Art der Simulationssprache, da diese die Struktur des realisierten Modells ganz einschneidend mitbestimmt.

Eine der üblichen problemorientierten Sprachen hätte den Vorteil der großen Flexibilität gehabt, andererseits aber einen völligen Neuaufbau eines komplexen Warteschlangensimulators erfordert.

Die bekannten Simulationssprachen SIMULA, SIMSCRIPT, GPSS, GASP usw. dagegen benötigen alle einen eigenen Compiler.

Sie verfügen jedoch über eine leistungsfähige Ablaufsteuerung des Simulationsprogrammes. Es erschien daher zweckmäßig, eine

1) New (1974).

Mischung zwischen den beiden Möglichkeiten zu wählen. Dazu bot sich die von Niemeyer vorgeschlagene und weiterentwickelte Sprache GPSS/FORTRAN. Sie hat den Vorteil, einerseits aus einzelnen FORTRAN-Unterprogrammen und einem FORTRAN-Rahmenhauptprogramm zu bestehen und andererseits die Ablaufsteuerung von GPSS zu übernehmen. Damit sind dem Benutzer gute Eingriffsmöglichkeiten in einer weitverbreiteten Programmiersprache gegeben und gleichzeitig wird ein leistungsfähiger Simulator zur Verfügung gestellt.¹⁾

Im weiteren Verlauf dieses Abschnittes soll nun die Struktur des Modells dargestellt werden.

Abb. 3.2.4.1 - 1 zeigt die Versorgung des Modells der Röntgenabteilung mit den Eingabedaten sowie die resultierenden Ergebnisse. Hauptsächliches Ziel der Arbeit war es, durch Variation von Eingabeparametern und Teilbereichen der Röntgenabteilung zu untersuchen, welche Konfiguration von Struktur und Parametern die Röntgenabteilung die an sie gestellten Aufgaben am wirkungsvollsten bewältigen lassen.

In Abb. 3.2.4.1 - 1 sind lediglich die wichtigsten im Modell realisierten Einflüsse und Ergebnisse dargestellt, jedoch erschöpfen sich damit keineswegs die Möglichkeiten des Modells. Durch geringe Änderungen lassen sich z.B. weniger bzw. mehr Röntgenräume u.a.m. implementieren.

Im Verlaufe der vorliegenden Untersuchung wurde vor allem der Bereich der kurzfristigen Ablaufplanung behandelt. Die Ergebnisvariablen sind dann besonders charakteristische Werte, die die Effizienz des Arbeitsablaufes und die Belastung für Patienten und Personal messen.

Im Folgenden soll nun die Struktur des Modells behandelt werden (Abb. 3.2.4.1 - 2).

Sie verläuft grob gesehen analog zu dem in Abb. 3.2.2.3.11 - 1 dargestellten Ablauf der Röntgenabteilung. Einzige gravierende Änderung gegenüber Abb. 3.2.2.3.11 - 1 ist die Verlegung

1) Eine kurze Darstellung der Grundzüge von GPSS/FORTRAN folgt im Abschnitt 3.2.4.2.

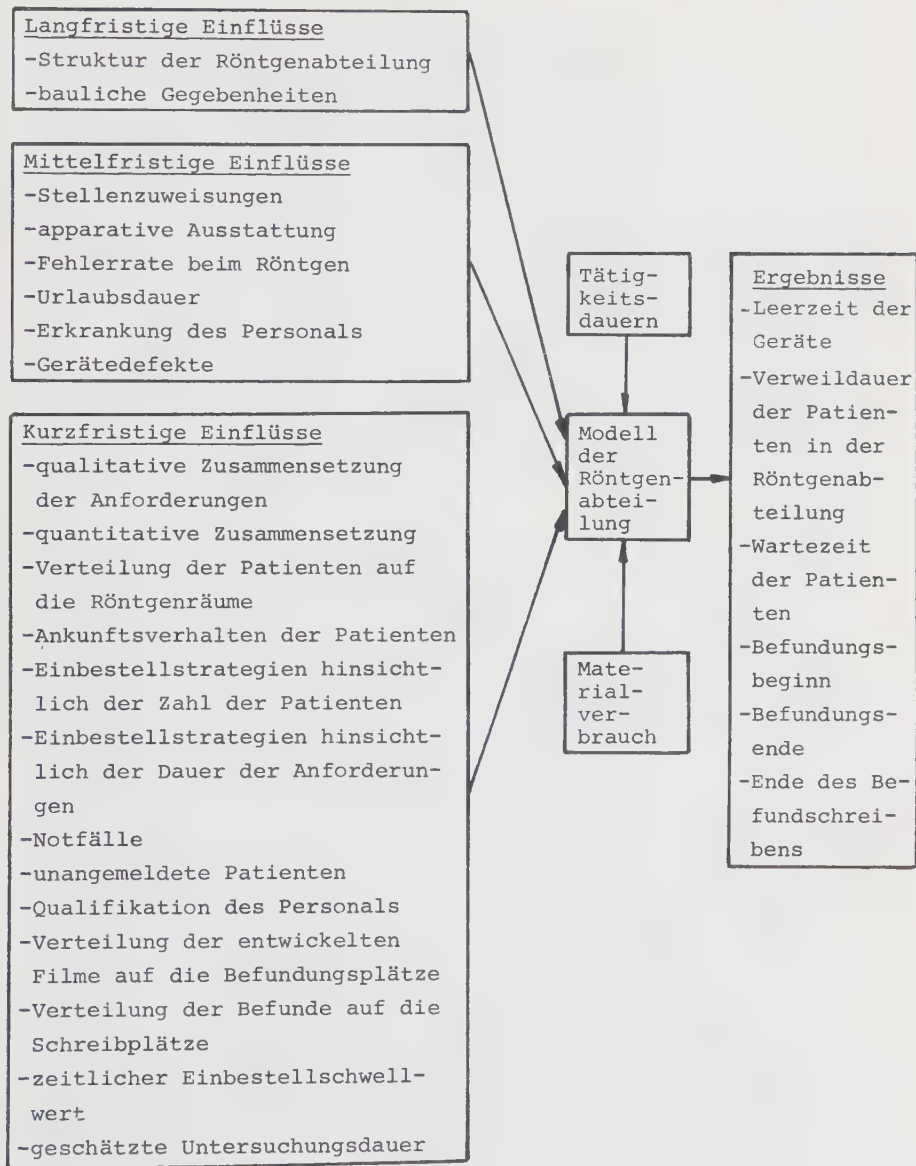


Abb. 3.2.4.1 - 1: Eingabedaten und Ergebnisse des Modells

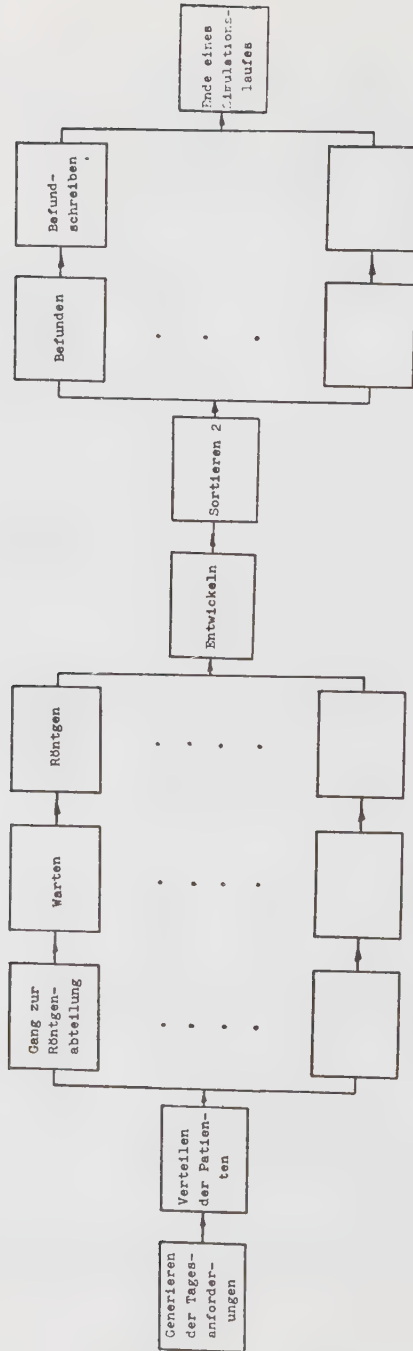


Abb. 3.2.4.1 - 1: Übersichtsdarstellung des Simulationsmodells

der Verteilung der Patienten in Sortieren 1 auf den Tag der Leistungserstellung. Die Verteilung der Patienten auf die Röntgenräume geschieht über das Telefon beim Einbestellvorgang. Dies war aus programmtechnischen Gründen nötig. Weiter wird jedem Röntgenraum je ein "virtueller" Röntgenraum und Ankunfts"kanal" zugeordnet. Auch das bietet sich aufgrund der Struktur von GPSS an, die es ermöglicht, Warteschlangenkanäle und Bedienungsstationen einfach zu realisieren. In Wirklichkeit gibt es nur einen Warteraum, aber sehr viel mehr als sechs Ankunftskanäle. Da 18 verschiedene Untersuchungsarten definiert wurden, ferner die Anforderungsanzahl je Untersuchungsart an den einzelnen Wochentagen unterschiedlich waren, muß pro Wochentag und Anforderungsart ein Zufallszahlengenerator installiert werden, der die täglichen Anforderungen erzeugt.

Darauf werden die einzelnen Anforderungen aufgrund der Notfallwahrscheinlichkeiten und der Wahrscheinlichkeiten für die Zahl der unangemeldeten Patienten - falls diese Ausnahmefälle auftraten - mit einer entsprechenden Kennzeichnung versehen und die jeweilige Ankunftszeit bestimmt. Außerdem werden die Fremdbefundungen generiert. Die übrigen "normalen" Anforderungen werden auf die einzelnen Röntgenräume verteilt.

Hier ist auf eine gewisse Problematik der Modellkonstruktion aufmerksam zu machen: Es wird nämlich bis auf eine Ausnahme nicht zwischen Patienten, MTA, Ärzten, Anforderungsbelegen, Filmen und Befunden unterschieden. Dies ist aber auch nicht notwendig. Im Modell ist jeweils dasjenige Objekt in Aktion, das einen Beitrag zum zeitlichen Aufwand bei der Leistungserstellung liefert oder mit dem Operationen vorgenommen werden. Als Beispiel möge der Übergang zwischen der oben geschilderten Generierung und Verteilung von Anforderungen und dem Fluß von Patienten zur Röntgenabteilung dienen: Das Modell kennt keinen Unterschied zwischen dem Objekt Anforderung und dem Objekt Patient. Vielmehr durchläuft ein abstraktes Objekt (im nachfolgenden Abschnitt wird es Transaction genannt) das Modell und muß zu Darstellungszwecken mit den Begriffen Patient bzw. Anforderung belegt werden. In Abb. 3.2.4.1- 2 ist dieses abstrakte Objekt bis zum Ausgang des Kästchens, "Verteilung der Patienten" mit der Bedeutung "An-

forderung" und bis zum Kästchen "Röntgenraum" mit der Bedeutung "Patient" zu identifizieren. Nachdem diese Problematik erläutert wurde, soll der Rest des Modells dargestellt werden.

In den Röntgenräumen sind gleichzeitig Patienten, Ärzte und MTA anwesend. Das bedeutet, daß das abstrakte Objekt Patient, Ärzte und MTA gleichzeitig darstellt. Nach der Röntgenuntersuchung erfolgt jedoch eine Aufspaltung. Ein Objekt gelangt sofort zum Eingang des Entwicklers (belichteter Film), ein anderes (Patient) kehrt in den Warteraum zurück und wartet auf das Ende der Sofortbetrachtung, um danach, entweder auf seine Station bzw. zu einer weiteren Leistungsstelle zu gehen, oder einer erneuten Untersuchung unterzogen zu werden. Dieses Objekt unterliegt anschließend einem weiteren Bedeutungswandel, da nämlich die MTA eine Entscheidung über ein erneutes Einbestellen einer weiteren Patientengruppe treffen. Ist dies nötig, schließt sich der Vorgang "Telefonieren" an. Die Entscheidung über Einbestellen oder Nicht-Einbestellen von Patienten fällt die MTA aufgrund einer Abschätzung des zeitlichen Aufwandes für die Untersuchung der zum Entscheidungszeitpunkt wartenden Patienten. Sie geht dabei von geschätzten, mittleren Untersuchungsdauern MUE aus. Überschreitet die Summe dieser Dauern den Wert 10 Minuten, erfolgt keine Einbestellung, andernfalls wird eine feste Zahl von Patienten von den Stationen abgerufen. Die jeweiligen MUE der Untersuchungsarten, sowie der Einbestellschwellwert wurde durch Befragen der MTA bestimmt. Die Ergebnisse sind selbstverständlich recht grobe Näherungswerte der tatsächlichen Gegebenheiten. Tab. 3.2.4.1 - 1 zeigt die Werte von MUE.

Immer ist eine Rüstzeit gegeben, die sich an die beschriebenen Tätigkeiten anschließt. Dieser im Modell realisierte Ablauf ist in Abb. 3.2.4.1 - 2 im Kästchen "Röntgen-

Untersuchungsart	MUE [Minuten]
1	2
2	3
3	5
4	5
5	60
6	120
7	15
8	20
9	18
10	5
11	7
12	17
13	5
14	120
15	40
16	120
17	120
18	22

Tab. 3.2.4.1 - 1: mittlere Untersuchungszeit

raum" zusammengefaßt. Erst wenn die Rüstzeit beendet ist, hat das Objekt keine Funktion mehr, es wird aus dem Modell entfernt. Ein neuer Patient betritt den nun freigewordenen Röntgenraum. Unbeeinflusst davon ist das Objekt "belichteter Film", das durch dieselbe Anforderung entstanden ist, wie das eben entfernte Objekt.

Wie erläutert, geschieht am Eingang des Entwicklers ein Kombinationsprozeß durch den möglichst zwei Filme gleichzeitig in die Entwicklermaschine eingegeben werden. Dazu kommen aber nur Filme eines Patienten in Frage. Die MTA am Entwickler sammelt also nicht die Filme von mehreren Patienten, wählt die zusammenpassenden Formate aus und beschickt

dann den Entwickler. Dies würde den Ablauf beträchtlich stören, da die MTA bzw. die Ärzte in den Röntgenräumen darauf warten, die Sofortbetrachtung vornehmen zu können.

Danach, bis zum Ausgang "Befunden" haben die Objekte die Bedeutung "entwickelte Filme", darauf sind es "Befunde auf Tonband", zum Schluß "Filme und geschriebene Befunde".

Es ist zu beachten, daß die Abholung der geschriebenen Befunde in der gegenwärtigen Konfiguration erst am Mittag des zweiten Tages nach Anforderungsausstellung möglich ist. Im Modell wurde jedoch auch die Möglichkeit der Abholung am Abend der Leistungserstellung selbst vorgesehen.

Ein letzter Punkt betrifft die Unterscheidung von Kassenpatienten und Privatpatienten (Selbstzahlern).

Kohlschreiber¹⁾ ermittelte in seiner Arbeit über die Medizinische Klinik auch die Zahl der geröntgten Patienten eines Jahres (1972) aufgeschlüsselt nach Stationen. Daraus läßt sich ein Prozentsatz des Anteils von Privatpatienten an den gesamten geröntgten Patienten errechnen. In guter Übereinstimmung mit Schätzungen des Personals der Röntgenabteilung beträgt er ca. 30 %. Nach dem Generieren der Anforderungen werden diese mit einer Kennzeichnung für Privat- oder Kassenpatient versehen. Ein Teil der Privatpatienten (Durchleuchtungen) wird in D1 untersucht. Sonstige Untersuchungen finden für Kassen- und Privatpatienten in denselben Räumen statt.

Bei der Befundung tritt ebenfalls eine Trennung ein: Privatpatienten werden ausschließlich vom leitenden Oberarzt der Röntgenabteilung befundet.

Im Modell wird der Patientenstrom an diesen Stellen aufgespalten. Für Tätigkeiten, die Kassen- und Privatpatienten gemeinsam betreffen, wird die Unterscheidung wieder aufgehoben.

1) Kohlschreiber (1974), Blatt 88 f.

3.2.4.2 Realisation des Modells mit GPSS/FORTRAN

Nach der Modellbeschreibung soll nun die Umsetzung in ein GPSS/FORTRAN-Programm erläutert werden. Dabei sollen hier nur die Grundzüge dargestellt werden. Detaillierte Ausführungen zu GPSS/FORTRAN finden sich in der Literatur.¹⁾

Wie schon erwähnt, stellt GPSS/FORTRAN einen ereignisgesteuerten Simulator zur Verfügung. Zu jedem fälligen Ereignis (z.B. Beginn der Röntgenuntersuchung) werden Aktivitäten ausgelöst. Damit hängt der zeitliche Aufwand der für einen Simulationslauf aufgewendet werden muß, stark von der Ereignishäufigkeit ab. Als Zeiteinheit wurde eine Minute gewählt, da es im Modell praktisch keine kürzere Tätigkeit gibt. Die im vorigen Abschnitt schon erwähnten abstrakten Objekte werden in GPSS/FORTRAN "Transaction" genannt. Sie symbolisieren den Fluß der Objekte durch das Simulationsmodell. Allerdings darf man dieses Bild nicht zu wörtlich nehmen, da dieser Fluß allein in einer Änderung von Eintragungen in bestimmten Listen besteht. Der jeweilige Zustand des Gesamtsystems ist also am Zustand dieser Arbeitslisten abzulesen. So ist darin z.B. der Zeitpunkt vermerkt, zu dem ein Befundungsvorgang an einem bestimmten Befundungsarbeitsplatz beendet ist. Dem Fluß der Transaction geht ihre Generierung mittels eines speziellen Unterprogramms voraus. Die Transactions durchlaufen die vom GPSS/FORTRAN Simulator zur Verfügung gestellten bzw. selbst erstellten Unterprogramme, in denen Zeitverzögerungen, Umleitungen, Stauungen usw. simuliert werden können. Ferner werden stationäre Elemente verwendet, die sobald sie von einer Transaction belegt sind, für alle anderen gesperrt sind und erst wieder durch das Verlassen der belegenden Transaction freigeschaltet werden.

Es besteht die Möglichkeit, Transactions in mehrere Duplikate aufzuspalten, die dann verschiedene Zweige des Programmes durchlaufen können. Diese Duplikate können auch wieder vereinigt werden.

1) Niemeyer (1972); Schmidt (1973).

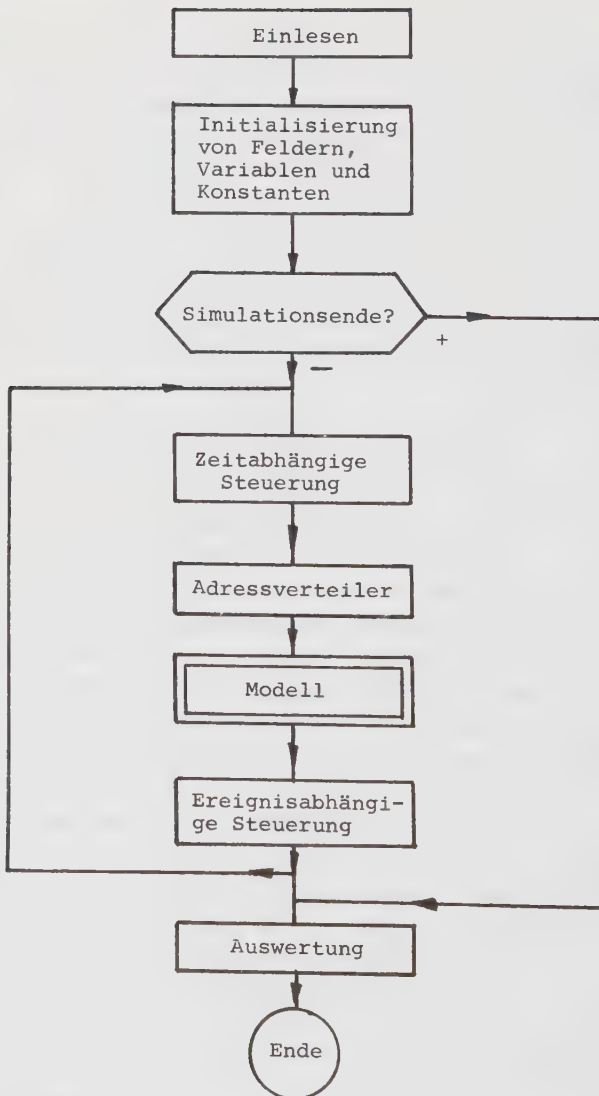


Abb. 3.2.4.2 - 1: Steuerung des Modells durch den GPSS-Simulator

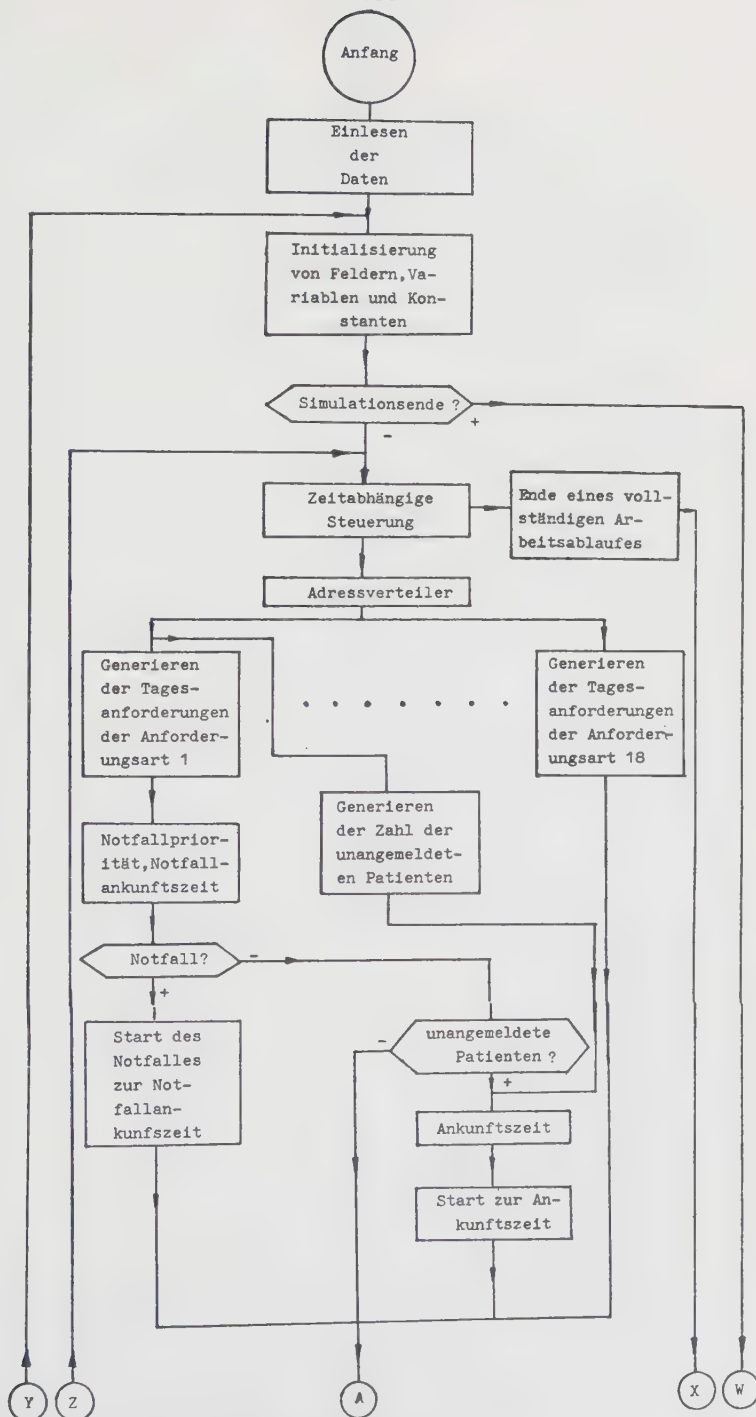


Abb. 3.2.4.2 - 2: Simulationsmodell

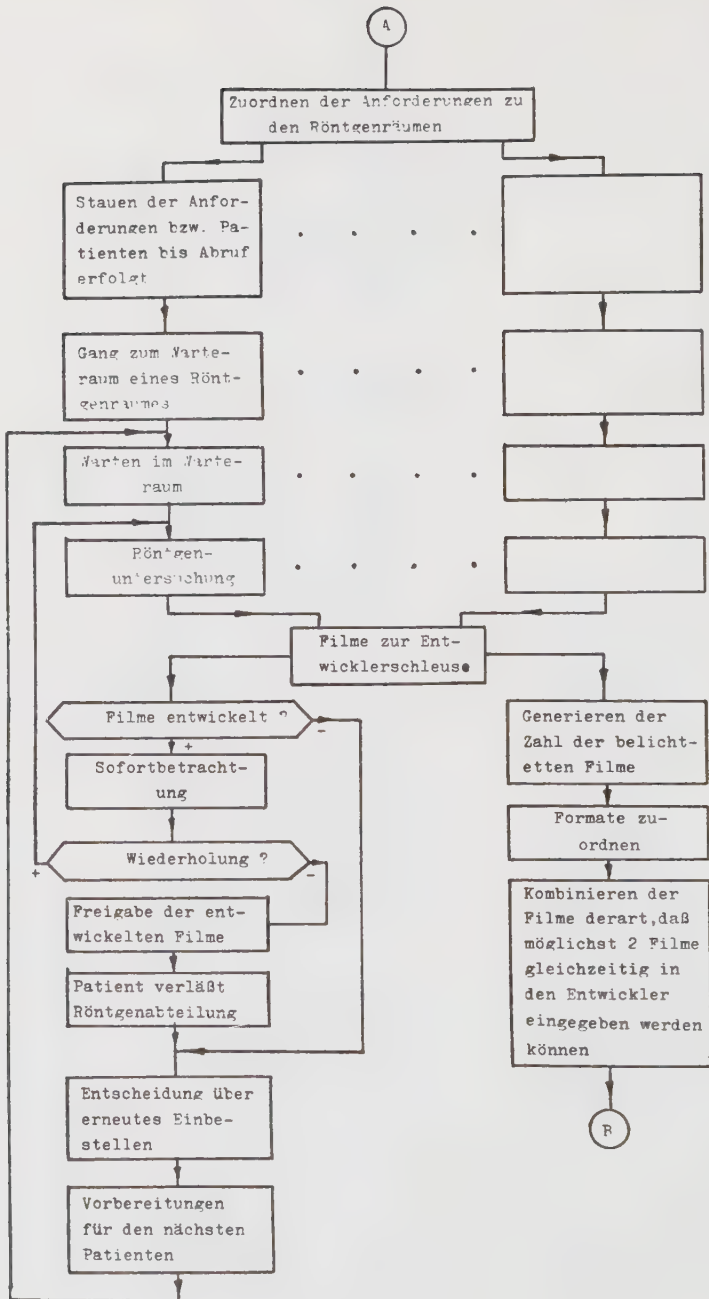


Abb. 3.2.4.2 - 2: Fortsetzung

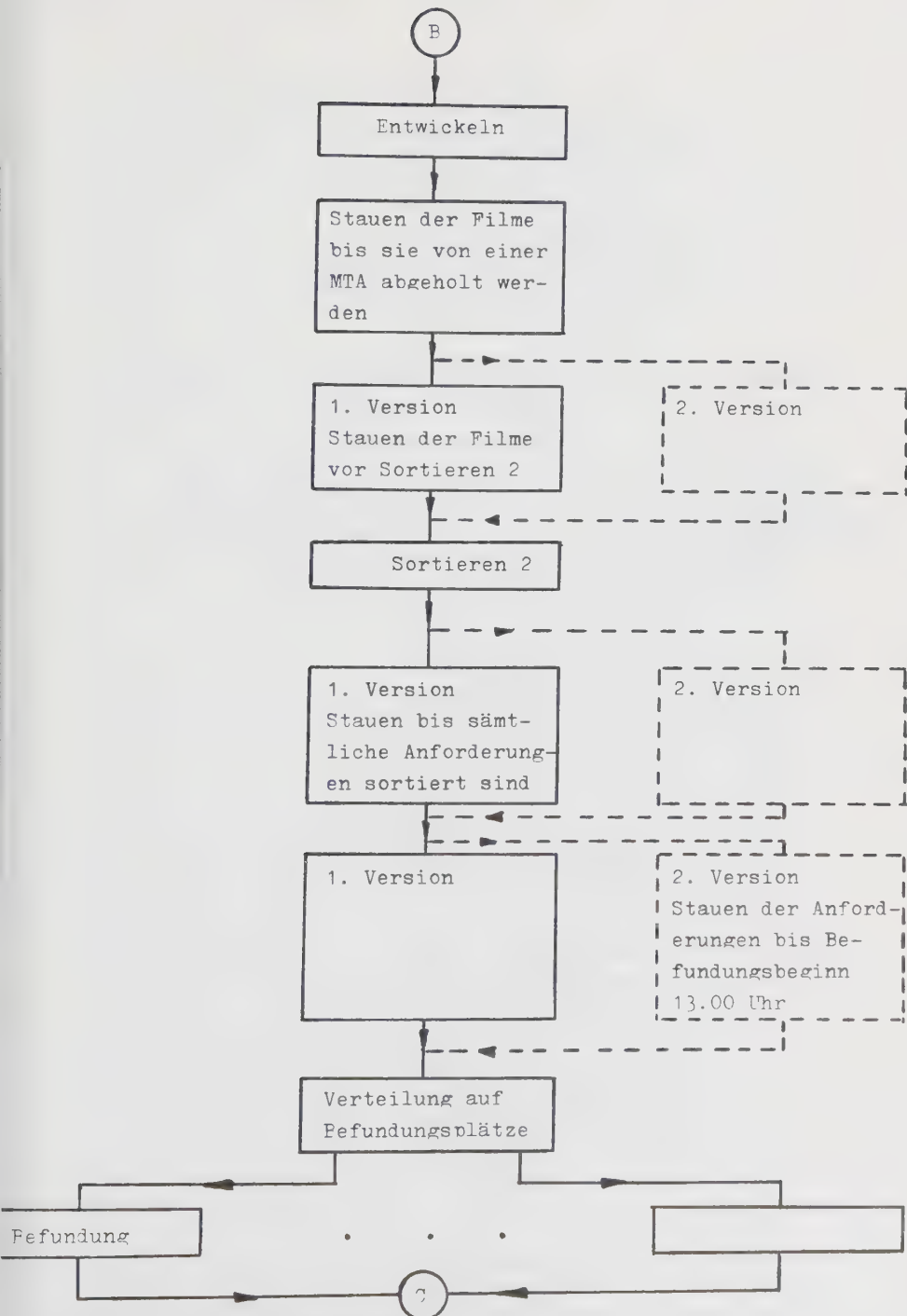


Abb. 3.2.4.2 - 2: Fortsetzung

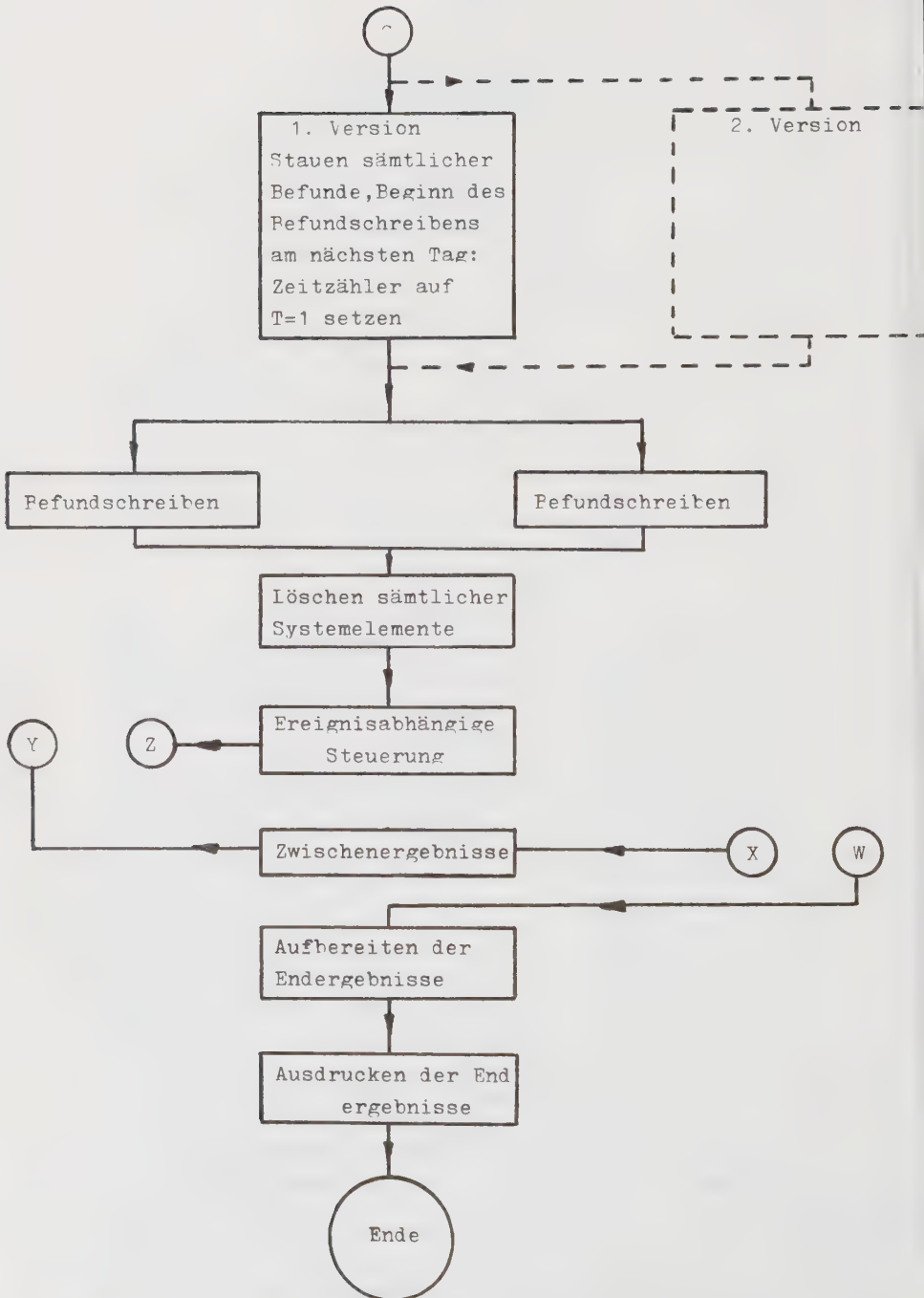


Abb. 3.2.4.2 - 2: Fortsetzung

Schließlich können Transactions noch aus dem Modell durch einen speziellen Unterprogramm-Aufruf entfernt werden.

Mit diesen und anderen Bausteinen ist es möglich, Quellen und Senken, Warteschlangenkanäle und Bedienungsstationen zu realisieren. Die Steuerung des Modells durch den GPSS-Simulator zeigt Abb. 3.2.4.2 - 1. Ein Übersichts-Flußdiagramm des gesamten Simulationsprogramms ist in Abb. 3.2.4.2 - 2 zu sehen.

Die Parameter von Wartesystemen wie Wartezeit und Warteschlangenlänge können aus Werten ermittelt werden, die Statistik-Unterprogramme liefern.

Die Berechnung dieser charakteristischen Kenngrößen für Warteschlangensysteme erfolgt über die Messung von Zeitmengen.¹⁾ Sämtliche vom GPSS/FORTRAN-Simulator zur Verfügung gestellten Unterprogramme wurden dem Modell angepaßt. Zusätzlich wurden eine Reihe von eigenen speziellen Unterprogrammen erstellt.

Von besonderer Bedeutung für das Simulationsmodell sind die Zufallszahlengeneratoren. GPSS/FORTRAN stellt folgende Zufallszahlengeneratoren zur Verfügung:

- gleichverteilte Zufallszahlen
- rechteckverteilte Zufallszahlen
- normalverteilte Zufallszahlen²⁾
- erlangverteilte Zufallszahlen (nicht verwendet)

Zusätzlich zu diesen Zufallszahlengeneratoren wurde durch einfache Transformation von normalverteilten Zufallszahlen logarithmisch-normalverteilte Zufallszahlen erzeugt:

Der Generator für die Normalverteilung liefert eine (0,1)-normalverteilte Pseudozufallszahl u.

Durch die Transformation

$$(3.2.4.2 - 1) \quad x = \exp(u\sigma + \log f)$$

1) Niemeyer (1972), S. 23.

2) Box, Muller (1958).

erhält man eine logarithmisch-normalverteilte Pseudozufallszahl x . Der χ^2 -Test zeigte, daß der Zufallszahlengenerator logarithmisch-normalverteilte Zufallszahlen mit guter Näherung erzeugte. Hierbei sind σ und $\log \{$ die Parameter der logarithmischen Normalverteilung.

3.2.4.3 Aussagemöglichkeiten des Modells

Im Rahmen der zur Verfügung stehenden Möglichkeiten an der TR 440 der Informatik-Abteilung der Universität Erlangen-Nürnberg, konnten nur einige ausgewählte Aspekte der Ablaufplanung für die Röntgenabteilung berücksichtigt werden.

Dennoch sollen hier die Aussagen, zu denen das Modell fähig ist, insgesamt dargestellt werden. Die letztlich behandelten Fragestellungen werden eingehender behandelt.

Mit Hilfe der Simulation können Auskünfte über die globale Fragestellung der Auswirkung von Änderungen der Werte von Eingabeparametern, sowie von Modellstrukturen gegeben werden.

Weitreichende Auswirkungen haben selbstverständlich lediglich die Strukturänderungen.

Dies sind im Falle des vorliegenden Modells Änderungen

- der Bauten,
- der apparativen Ausstattung,
- der personellen Ausstattung,
- der Untersuchungsorte,
- Kommunikationsverbindungen
(Formulartransport, Rohrpost, Telefon, Sprechfunk über Draht oder drahtlos, Datenleitung),
- Ablauforganisation.

Die Struktur einer Röntgenabteilung wird stark von den baulichen Gegebenheiten geprägt. Die Zahl und die Anordnung der Arbeitsräume beeinflussen den Arbeitsablauf. Ebenso sind die Kommunikationsverbindungen strukturelle Variable. Unter apparativer Ausstattung ist die Zahl und Art insbesondere der Röntgengeräte zu verstehen. Es ist möglich, im Modell mehr oder weniger Röntgengeräte vorzusehen (ohne die bauliche Struktur zu ändern). Ferner gibt es unterschiedliche Typen von Röntgengeräten. Die neuesten Geräte ermöglichen eine schnellere Bewegung des Patienten bei fester Röntgenröhre (Durchleuchtungen). Darüber hinaus sind Geräte entwickelt worden, die belichtete Kassetten unmittelbar in einen an das Röntgengerät gekoppelten Entwickler ausstoßen. Damit entfällt der umständliche Transport der Kassetten zur Entwicklerschleuse.

Änderungen von Eingabeparametern sind möglich bezüglich:

- quantitativer Anforderungsanfälle
- Patientenankünfte
- apparatives Layout
- Einbestellstrategien nach der Zahl der einzubestellenden Patienten
- Einbestellstrategien nach bestimmten Prioritätsregeln
- Kassettentransportstrategien
- Verteilung der Patienten auf die Röntgenräume
- Notfallankünfte
- unangemeldete Patienten
- fachliche Kompetenz des Personals
- zeitlicher Einbestellschwellwert
- geschätzte Untersuchungsdauern
- Fehlerrate beim Röntgen
- Verteilung der Filme auf die Befundungsplätze
- Verteilung der Befunde auf die Schreibplätze
- Erkrankung des Personals
- Urlaubsdauer des Personals
- Geräte-Defekte

3.2.4.4 Beurteilung des Modells

Ein ganz wesentliches Ergebnis stellen natürlich Aussagen über die Güte dar, mit der das vorliegende Modell, die Wirklichkeit (der Röntgenabteilung) abbildet.

Dadurch bestimmt sich auch die Verlässlichkeit der Simulationsergebnisse. Einzig mögliche Kriterien für die Feststellung der Modellgüte sind

- logische Konsistenz und
- Vergleich mit der Wirklichkeit.

Auf den ersten Punkt soll hier nur kurz eingegangen werden, da er ansonsten mit dem Abschnitt Modellbeschreibung abgehandelt ist. Die logische Konsistenz des Modells läßt sich ferner aufgrund der unten beschriebenen Ergebnisse teilweise überprüfen. Betrachtet man nämlich z.B. die Tab. 3.2.5.1 - 1, so ist deutlich die gegenläufige Tendenz von Wartezeit und (normierter) Leerzeit zu beobachten (bezüglich der Ausnahme Röntgengerät 3, siehe unten). Dieser Effekt tritt bei jedem Ablaufplanungsproblem auf.

Der Vergleich mit der Wirklichkeit ergibt, soweit es sich um die Abbildung der gegenwärtigen Struktur der Röntgenabteilung handelt, eine recht gute Übereinstimmung mit den Angaben des Personals bezüglich einiger kritischer, signifikanter Zeitpunkte.

Was die Alternativen zum gegenwärtigen Arbeitsablauf betrifft, so ist man dabei notwendigerweise auf Plausibilitätsüberlegungen angewiesen. So muß das Modell beispielsweise bei Erhöhung der Zahl der pro Einbestellvorgang von den Stationen abgerufenen Patienten einerseits eine Erhöhung der Wartezeiten dieser Patienten, aber andererseits eine Verminderung der Leerzeit mit sich bringen. Dies ist auch der Fall, wie im folgenden Abschnitt noch näher ausgeführt wird. Ähnliches gilt auch für andere parametrische und strukturelle Änderungen des Modells.

3.2.4.5 Auslegung und Bemessung der Simulation

Für die Planung der Simulationsläufe ist es wichtig, gewisse Kenntnisse über den durch die Simulation abgebildeten Prozeß zu haben.

Streng genommen hat man es mit einem stochastischen Prozeß zu tun, der sich aus Zufallsvariablen für jedes Simulationsintervall - hier ein Tag - zusammensetzt. Jede Zufallsvariable besitzt im allgemeinen Fall eine spezifische Verteilung und ist von der vorhergehenden Zufallsvariablen abhängig. Diese Annahmen müssen jedoch etwas eingeschränkt werden, um das Modell verwirklichen zu können.

Man nimmt zunächst an, daß man es mit einem stationären Prozeß zu tun hat, d.h. die Verteilungen der Zufallsvariablen sind invariant gegen zeitliche Verschiebungen. Diese Annahme ist im Falle des vorliegenden Modells gerechtfertigt, da zwangsläufig auf Daten aus der Vergangenheit zurückgegriffen werden muß, die dann für einen gewissen Zeitraum als fest vorgegeben angenommen werden. Veränderungen über die Zeit, d.h. die Rückführung auf einen nicht-stationären Prozeß können durch Variation der Eingabedaten nachgebildet werden.

Ein weiteres Problem besteht darin, daß man den stochastischen Prozeß nicht genau kennt, da die Vergangenheit nur eine einzige Realisation pro Zufallsvariable liefert.

Um dennoch zumindest eine Aussage über die Mittelwertsfunktion der Variablen machen zu können, müssen bestimmte Voraussetzungen gegeben sein:

Es muß die hinreichende Bedingung der Mittelwert-Ergodizität gelten. Diese besagt, daß zeitlich weit entfernte Zufallsvariable praktisch nicht mehr miteinander korreliert sein sollen.¹⁾

1) Vgl. Wetzel (1970), S. 15.

Es ist dann die Beziehung

$$(3.2.4.5 - 1) \quad \lim_{v \rightarrow \infty} E ((\bar{X}_v - E(X(t)))^2) = 0$$

erfüllt.

Hierbei ist $\bar{X}_v$ das Zeitmittel, d.h. der Mittelwert über alle Realisationen, $E(X(t))$ ist das Scharmittel, d.h. der Mittelwert der einzelnen Zufallsvariablen pro Simulationsintervall.

Die obige Beziehung sagt aus, daß für genügend viele Realisationen Scharmittel und Zeitmittel im quadratischen Mittel konvergieren. Einen derartigen stochastischen Prozeß nennt man schwach stationär.¹⁾

Da aufgrund der logischen Struktur des Ablaufs in der Röntgenabteilung ersichtlich ist, daß eine Korrelation über mehrere Intervalle - hier sind es Tage - zu vernachlässigen ist, kann davon ausgegangen werden, daß es sich hier um einen schwach stationären Prozeß handelt.

Damit ist es dann möglich, sich im weiteren Verlauf auf das Zeitmittel zu stützen.

Dies hat einen nachhaltigen Einfluß auf die Simulationsgestaltung. Statt für eine Programmkonfiguration eine ausreichende Zahl von Simulationsläufen über viele Simulationstage hinweg vorzusehen, ist es dann nur noch notwendig, einen Lauf pro Konfiguration anzusetzen.

Auch von der Rechenzeit her gesehen ist dies der einzig vertretbare Weg, um zu Ergebnissen zu gelangen.

Ein weiteres Problem stellt die Organisation von Simulationsläufen dar.²⁾ Hier kann man aufgrund der Problemstellung davon ausgehen, daß der Ablauf eines Tages Aussagen über die interessierenden Ergebnisparameter (Abb. 3.2.4.1 - 1) liefert, wie z.B. Warteschlangenlänge.

Diese Parameter sind nun selbst Mittelwerte bezüglich eines

1) Wetzell (1970), S. 14.

2) Niemeyer (1972), S. 228.

Arbeitstages. Das Warteschlangenverhalten an einem Tag beinhaltet aber wenig Aussagekraft, da es nur für ein bestimmtes Anforderungsspektrum Gültigkeit hat. Wichtiger ist das Verhalten über eine Reihe von Tagen bei unterschiedlichen Anforderungsspektren.

Das Verhalten an einem Tage ist auch deswegen ohne große Bedeutung, als davon ausgegangen werden kann, daß z.B. in den Röntgenräumen praktisch kein Anlaufvorgang¹⁾ existiert, da die Einbestellung grundsätzlich von den MTA vorgenommen wird. In allen übrigen Teilbereiche, wie Sortieren 2, Befunden, Befundschreiben, sind nur die spätesten Endzeitpunkte von Bedeutung. Daher ist es angebracht, einen Tag als eine Realisation der Ergebnisparameter Verweildauer, Kapazitätsauslastung usw. zu betrachten. Damit werden dann zur Ermittlung von Statistiken die Werte jedes Tages für eine Reihe von Tagen kumuliert. So erhält man die Ergebnisse für einen vollständigen Simulationslauf. Variationen von bestimmten Eingabeparametern bzw. Strukturänderungen der Modelle und erneute Simulation über die gleiche Zahl von Tagen mit den gleichen Startbedingungen für die Zufallszahlengeneratoren liefern Ergebnisse, die untereinander vergleichbar sind, d.h. Grundlage von Entscheidungen sein können.

Schließlich ist noch der Stichprobenumfang, d.h. die Zahl der zu simulierenden Tage festzulegen. Der Stichprobenumfang ergibt sich aus einer Festlegung des Vertrauensintervalls für den jeweiligen Mittelwert der durch die Simulation gewonnenen Ergebnisse. Vorausgesetzt wird dabei, daß der Zufalls-"Fehler" des Mittelwertes $\bar{X}$ eines Ergebnisses X (ξ , $s/\sqrt{n}$)-normalverteilt ist.²⁾ Obwohl dies nicht für alle vorliegenden Ergebnisse zutrifft (siehe nächster Abschnitt) wird die Bestimmung des Stichprobenumfangs unter den obigen Voraussetzungen vorgenommen, da ja nur eine grobe Abschätzung notwendig ist. Da sämtliche erhobenen Daten jeweils nur für ein Jahr gelten, ist der Umfang der Grund-

1) Siehe hierzu unten.

2) Heinhold, Caede (1972), S. 114. s ist die Standardabweichung der Gesamtheit der Merkmalswerte (hier Ergebnisparameter).

gesamtheit endlich. Er beträgt unter Abrechnung von Sonntagen, Samstagen und Feiertagen ca. 250 Tage. D.h. der Stichprobenumfang kann höchstens 250 betragen. Damit kann man für die Standardabweichung des Zufallsfehlers des Mittelwertes $\bar{X}$ folgende Formel einführen.¹⁾

$$(3.2.4.5 - 2) \quad \sigma_{\bar{X}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \sqrt{1 - \frac{n}{N}}$$

Dabei ist N der Umfang der Grundgesamtheit, n der Stichprobenumfang, $\sigma_{\bar{X}}$ die Standardabweichung der Variablen X. Der Wurzelausdruck berücksichtigt, daß n der Stichprobenumfang der endlichen Grundgesamtheit N ist.

Gilt $N \rightarrow \infty$ so geht der Wurzelausdruck gegen 1. Damit ergibt sich $\sigma_{\bar{X}}$ für unendlich Gesamtheiten.

Nun läßt sich ein Vertrauensintervall mit einer Wahrscheinlichkeit P % angeben, innerhalb dessen der Erwartungswert $\bar{X}$ liegt.²⁾

$$(3.2.4.5 - 3) \quad P \left\{ \left| \frac{\bar{X} - \{ \}}{\frac{s}{\sqrt{n}} \sqrt{1 - \frac{n}{N}}} \right| \leq \lambda_{P\%} \right\} = P\%$$

Hierbei stellt $\{ \}$ den exakten Mittelwert dar.

Gibt man nun eine Sicherheitswahrscheinlichkeit P %, und den absoluten zulässigen Zufallsfehler $\bar{X} - \{ \}$ vor, so kann man sich den Stichprobenumfang wie folgt errechnen:

$$(3.2.4.5 - 4) \quad n \geq \frac{1}{\frac{(\bar{X} - \{ \})^2}{\lambda_{P\%}^2 s^2} + \frac{1}{N}}$$

Das noch nicht bekannte s muß man sich aus Probeläufen bestimmen. Für die Sicherheitswahrscheinlichkeit P % wählt man üblicherweise Werte wie 99 %, 95 %, 90 %. Hier wurde 95 % gewählt. Der absolute zulässige Fehler $\bar{X} - \{ \}$ ergibt sich aus der Problemstellung: Im vorliegenden Fall bewegen sich die

1) Pfanzagl (1972), S. 144.

2) Heinhold, Gaede (1972), S. 122.

Ergebnisse in der Größenordnung von einigen zehn Minuten bei einigen Stunden. Der Wert $\bar{X}$ konnte also höchstens ca. fünfzehn Minuten betragen. Der Sicherheitswahrscheinlichkeit und dem absoluten Fehler sind jedoch die aufgewendete Rechenzeit gegenüberzustellen.

Setzt man nun z.B. für die Verweildauer der Patienten in der Röntgenabteilung aufgrund von Probelaufen s mit 40 Minuten an und wählt für $\bar{X}$ den Wert acht Minuten, so erhält man nach $(3.2.4.5 - 4)$ den Stichprobenumfang 69,38. Danach sind mindestens 70 Läufe, d.h. zu simulierende Tage vorzusehen.

Da für die übrigen Ergebnisparameter zum Teil größere Stichprobenumfänge notwendig sind, wurde als gemeinsamer Wert der Stichprobenumfang mit 80 angesetzt.

Ein weiteres Problem, das bei der Gestaltung von Simulationsläufen zu berücksichtigen ist, betrifft die Anlaufphase des Modellverhaltens.

In vielen realen Warteschlangensystemen wird ein stationärer Zustand bezüglich der charakteristischen Größen wie mittlere Wartezeit, mittlere Warteschlangenlänge erst erreicht, nachdem eine Reihe von Elementen das System passiert haben.

Im Extremfall erreicht ein System seinen stationären Zustand innerhalb einer vertretbaren Rechenzeit überhaupt nicht. Das vorliegende Wartesystem stellt jedoch ein anderes Extrem dar, da es keine Anlaufphase aufweist.

Die Kenngrößen Wartezeit, Leerzeit usw. beziehen sich ausschließlich auf den Ablauf eines Arbeitstages. Eine Anlaufphase über einige Tage hinweg widerspricht dem oben beschriebenen Ablauf. Eine kurze Anlaufphase ergibt sich lediglich beim täglichen Beginn der Untersuchungen. Dies hat jedoch keinen Einfluß auf den Gesamtablauf. Die Kenngrößen in bestimmten Zeitintervallen pro Tag haben keine Aussagekraft bezüglich der untersuchten Problematik.

Der Rechenzeitaufwand, der für die Simulation der 80 Tage aufzuwenden war, nahm beträchtliche Ausmaße an. Er betrug je

nach Eingabeparameter ca. 33 Minuten. Der Rechenaufwand wird bei GPSS/FORTRAN wesentlich vom Durchsuchen der Parameterlisten verursacht. Sind diese Listen oft zu inspizieren, steigt die Rechenzeit erheblich.

Des weiteren fällt ins Gewicht, daß das Programm in segmentierter Form gerechnet wurde, um den Kernspeicherbedarf in Grenzen zu halten. Auch diese Maßnahme ist zeitintensiv. Für den Speicherbedarf waren 50 k Bytes Kernspeicher und 121 k Bytes Trommelspeicher vorzusehen.

Diese Werte gelten für eine TR 440-Anlage, auf der die Simulationsläufe durchgeführt wurden.

Den prinzipiellen Aufbau der Realisation des Modells auf dem Rechner (Telefunken TR 440 der Informatik-Rechnerabteilung der Universität Erlangen-Nürnberg) zeigt Abb. 3.2.4.5 - 1. Die für die Programmversorgung nötigen Dateien, sowie die Hauptprogramm- und Unterprogrammdatei werden über die Programmsteuerung zum Simulationsprogramm zusammengeführt. Die Programmsteuerung selbst kann über Lochkarten erfolgen. Da an der TR 440 eine bequeme Steuerung des Programmes über Sichtgerät möglich war, wurde jedoch bei der Ausführung der Simulationsläufe meist der zweite Weg gewählt.

3.2.5 Ergebnisse

Aus der Fülle der möglichen Fragestellungen konnten nur einige durch Simulationsläufe bearbeitet werden.

Insbesondere sollten Aufschlüsse über kurz- oder mittelfristige Änderungen des Arbeitsablaufes, im Hinblick auf eine günstigere Gestaltung, untersucht werden. Dazu wurden einige charakteristische Merkmalsgrößen definiert:

1. Die mittlere Gesamtverweilzeit eines Patienten in der Röntgenabteilung, die für die Erstellung einer Leistung pro Tag notwendig ist. Diese Zeit wird vom Verlassen der Station bis zum Verlassen der Röntgenabteilung gerechnet.
2. Die mittlere Wartezeit der Patienten vor den Röntgenräumen pro Tag.
3. Mittleres Verhältnis von Leerzeiten zu gesamter Inanspruchnahme für alle Röntgenräume pro Tag (Inanspruchnahme bedeutet den Zeitpunkt zwischen Arbeitsbeginn und Arbeitsende an einem Arbeitsplatz).

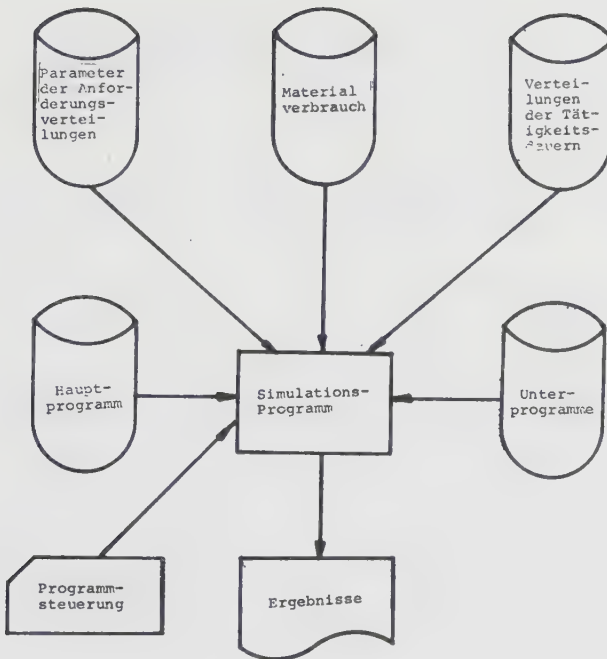


Abb. 3.2.4.5 - 1: Kommunikation des Simulationsprogramms mit peripheren Einheiten

4. Frühester Beginn des Befunds (= spätestes Ende des Sortieren 2).
5. Spätestes Ende des Befunds.
6. Spätestes Ende des Befundschreibens.

Für diese Variablen ergeben sich durch die Simulation jeweils Verteilungen. Allerdings wurden die Daten über die ein-

zeln Röntgenräume, Befundplätze und Schreibplätze gemittelt. Zusätzlich wurden die

7. mittlere Wartezeit pro Tag und Röntgenraum und das
8. mittlere Verhältnis von Leerzeiten zu gesamter Inanspruchnahme je Röntgenraum und Tag

errechnet.

Diese Merkmalsgrößen dienten als Kriterien zur Beurteilung von alternativen Arbeitsabläufen.

Verweildauern und Wartezeiten sind charakteristische Größen in der Ablaufplanung.¹⁾ Dies gilt auch für Leerzeiten. Hier wurde eine relative Leerzeit, nämlich der Quotient Leerzeit zu Inanspruchnahme, eingeführt, da die absolute Leerzeit eines Gerätes nur bedingt aussagekräftig ist. Es ist nämlich die Arbeitszeit an den Röntgengeräten pro Tag aufgrund des unterschiedlichen Anforderungsanfalls starken Schwankungen unterworfen. Um diesen Umstand zu berücksichtigen, führt man eine auf die jeweilige Dauer dieser Arbeitszeit bzw. Inanspruchnahme normierte Leerzeit ein. Man bezieht also die Leerzeit auf die Zeit der Inanspruchnahme des Gerätes durch Tätigkeiten, die in Zusammenhang mit der Leistungserstellung stehen. Damit erhält man einen Hinweis auf das ablaufbedingte Leerstehen dieses Gerätes. Es ist zu beachten, daß in die Leerzeiten nicht die Zeiten eingerechnet sind, zu denen Geräte nach Abschluß der letzten Tätigkeit bis zum Ende eines Arbeitstages bzw. bis zum Beginn der ersten Tätigkeit leerstehen. Diese strukturellen Leerzeiten sind Folge einer zu geringen personellen Ausstattung und weisen darauf hin, daß die theoretische, technische Kapazität der Röntgenabteilung bei weitem nicht ausgeschöpft ist.

Die Merkmalsgrößen 4. - 6. wurden deswegen gewählt, weil sie für den nachmittäglichen Arbeitsablauf der Röntgenabteilung besonders signifikante Zeitpunkte darstellen. Es hängt nämlich das Ende des Arbeitstages der Röntgenologen ganz wesentlich vom frühestmöglichen Beginn des Befundes ab. Insbeson-

1) Mensch (1968), S. 42 ff.

dere klagen die Ärzte darüber, daß manchmal der früheste Befundungsbeginn nach 17.00 Uhr liegt, was zu einem spätesten Befundungsende weit nach 19.00 Uhr führen kann. Damit würde der Arbeitstag nahezu 12 Stunden betragen.

Die Simulationsläufe lieferten Verteilungen der Merkmalsgrößen, da sich selbstverständlich für jeden Tag andere Realisationen einstellten. Diese Verteilungen sind in den nachfolgenden Abschnitten dargestellt. Da sich nicht durchweg eine bestimmte Verteilungsklasse ergab, macht auch die Form der Verteilung wichtige Aussagen möglich.

3.2.5.1 Gegenwärtiger Zustand der Röntgenabteilung

Ausgangsbasis von Beurteilungen war der in Abschnitt 3.2.2 beschriebene, gegenwärtige, materielle und personelle Zustand der Röntgenabteilung. Hier erbrachte die Simulation die in den Abb. 3.2.5.1 - 1 bis 3.2.5.1 - 6 und Tab. 3.2.5.1 - 1 aufgezeichneten Ergebnisse. Es ist in diesen und den folgenden Abbildungen an der Abszisse der Zufallsvariablen jeweils als Dimension die Zeit in Minuten zugeordnet. Die Zeiten für den frühesten Befundungsbeginn, das späteste Befundungsende und das späteste Ende des Befundschreibens beziehen sich jeweils auf den Arbeitsbeginn 8.00 Uhr.

Der Mittelwert der Verteilung ist in den Diagrammen jeweils mit XQU, die Standardabweichung mit SDV bezeichnet.

Betrachtet man die Verteilung der Verweilzeit der Patienten in der Röntgenabteilung (Abb. 3.2.5.1 - 1), so fällt sofort der überraschend hohe Mittelwert von über 1 1/2 Stunden auf. Selbst wenn man berücksichtigt, daß diese Verweilzeit die Dauer bis zum eigentlichen Eintreffen im Wartezimmer der Röntgenabteilung einschließt (90 % der Patienten treffen spätestens nach ca. 12 Minuten ein) und die daran anschließende Wartezeit im Mittel wieder ca. 14 Minuten beträgt (Abb. 3.2.5.1 - 2), bleibt eine beträchtliche Restzeit. Sie ergibt sich allein aus der Dauer des eigentlichen Röntgenvorganges und der nachfolgenden Wartezeit des Patienten. Die-

XQJ=101.71

SDV= 40.63

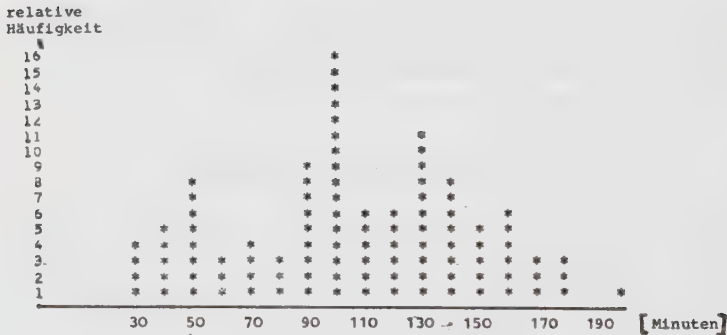


Abb. 3.2.5.1 - 1: Gegenwärtiger Zustand - Verweilzeit der Patienten in der Röntgenabteilung

se nachfolgende Wartezeit ist nun ausschließlich organisatorisch bedingt. Es gehen hier die Tätigkeiten des Kassetten- transports, des Sofortbetrachtens und des Einbestellens ein. Außerdem muß der Patient solange warten (soweit in seinem Fall eine Wiederholung etwaiger fehlerhafter Aufnahmen überhaupt möglich ist), bis seine Aufnahmen entwickelt worden sind und die MTA, die für diesen Patienten zuständig ist, gerade wieder in den MTA-Raum kommt, d.h. eine bzw. mehrere andere Untersuchungen beendet hat. Da die Sofortbetrachtung bei den meisten Aufnahmen möglich ist (z.B. Thorax), tritt häufig die Situation ein, daß der Patient relativ lange warten muß bis fest steht, daß seine Aufnahmen gelungen sind. Dies erklärt sich aus der Tatsache, daß sämtliche Filme der sechs Röntgen-

räume den Entwickler passieren müssen, hier aber im wesentlichen (Ausnahme: Kombinieren einiger Filmformate) lediglich ein sequentielles Abarbeiten möglich ist. Daraus läßt sich die Folgerung ableiten, daß an dieser Stelle des Arbeitsablaufes kaum eine Verbesserung möglich ist, es sei denn, eines oder mehrere Röntgengeräte werden mit angekoppelten Entwicklern ausgestattet; dies würde aber einen beträchtlichen Investitionsaufwand bedeuten.

Als weiterer Parameter ist in Abb. 3.2.5.1 - 2 und Tab. 3.2.5.1 - 1 die mittlere Wartezeit zu sehen. Die große Streuung in Abb. 3.2.5.1 - 2 erklärt sich durch die Mittelwerte für die Wartezeit in Tab. 3.2.5.1 - 1, mittlere Spalte.

Es ist zu sehen, daß diese Wartezeiten für die einzelnen Röntgenräume um mehr als den Faktor 10^2 schwanken. Vor dem Röntgenraum 3 (Durchleuchtungsraum 3) treten praktisch keine Warteschlangen auf, weil hier (bisher) nur sehr seltene, sehr lange dauernde Untersuchungen durchgeführt werden und die Zahl der jeweils einbestellten Patienten genau eins ist. Dagegen treten in den Röntgenräumen 4 und 5 (Aufnahmeräume 1 und 2) hohe Wartezeiten auf, da die Zahl der jeweils einbestellten Patienten höher ist und zufallsbedingte längere Untersuchungsdauern sich dann stärker bemerkbar machen. Zudem ist die Zahl der Tagesanforderungen hier besonders groß, so daß praktisch ein ununterbrochener Patientenstrom zu diesen Röntgenräumen herrscht.

Das Verhältnis Leerzeit zu Inanspruchnahme charakterisiert den ablaufbedingten Leerlauf in der Röntgenabteilung. Nennt man diesen Wert LJ, so gilt

$$(3.2.5.1 - 1) \quad 0 \leq LJ \leq 1$$

Im Idealfall konvergiert LJ gegen Null. Wie aus Abb. 3.2.5.1 - 4, rechte Spalte, ersichtlich, ist dies für die Röntgenabteilung im Mittel keineswegs der Fall. Nur einige Anforderungskonfigurationen lassen dies zu (Abb. 3.2.5.1 - 3).

Stellt man nun die in Tab. 3.2.5.1 - 1 aufgetragenen Werte

relative
Häufigkeit

$\bar{x}_{QJ} = 14,13$

$s_{QJ} = 16,42$

23
22
21
20
19
18
17
16
15
14
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1

0 4 8 12 16 20 24 28 32 36 40 44 48 52 56 [Minuten]

Abb. 3.2.5.1 - 2: Gegenwärtiger Zustand - Wartezeit vor den Röntgenräumen

von mittlerer Wartezeit und mittlerer relativer Leerzeit einander gegenüber, so stößt man auf das wohlbekannte Dilemma der Ablaufplanung. In diesem Fall drückt es sich dadurch aus, daß eine vergleichsweise niedrige Wartezeit, relativ hohe Leerzeiten und umgekehrt zur Folge hat. Ausnahme ist hier der Röntgenraum 3 aus den oben geschilderten Gründen. Nimmt man noch die Verweilzeit hinzu, so steht man vor dem Problem, den Arbeitsablauf so zu gestalten, daß diese drei Parameter, insgesamt gesehen, die günstigsten Werte annehmen.

Die weiteren Ergebnisparameter frühester Befundungsbeginn und spätestes Befundungsende (Abb. 3.2.5.1 - 4 und 3.2.5.1 - 5) hängen stark von dem jeweiligen Anforderungsspektrum ab. Der früheste Befundungsbeginn liegt deswegen sehr spät, weil das Sortieren 2 erst ab 13.00 Uhr stattfindet und erst beendet ist, wenn sämtliche Anforderungen sortiert sind. Die Werte des spätestens Ende des Befundschreibens beziehen sich auf den Arbeitsbeginn 8.00 Uhr am Tag nach der Untersuchung (Abb. 3.2.5.1 - 6).

$X_{JJ} = 0,17$

$SDV = 0,20$

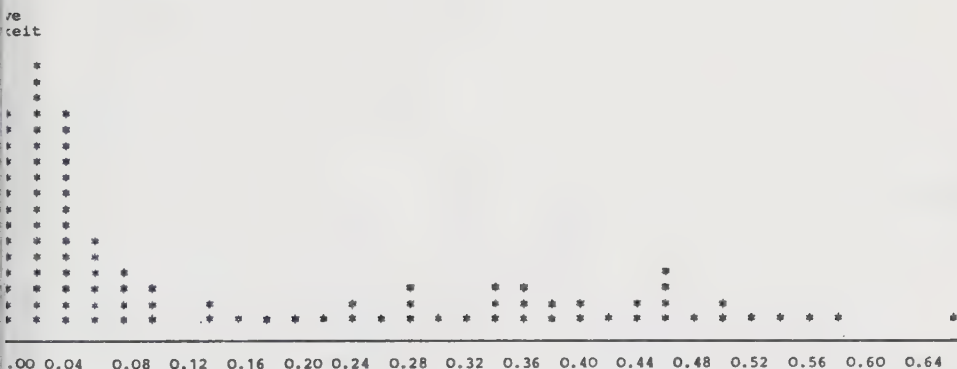


Abb. 3.2.5.1 - 3: Gegenwärtiger Zustand - Leerzeit/Inanspruchnahme

Röntgenraum	mittlere Wartezeit	mittlere relative Leerzeit
1	15,29	0,10
2	5,97	0,35
3	0,12	0,07
4	25,62	0,04
5	30,01	0,06
6	8,20	0,38

Tab. 3.2.5.1 - 1: Gegenwärtiger Zustand - Mittelwerte

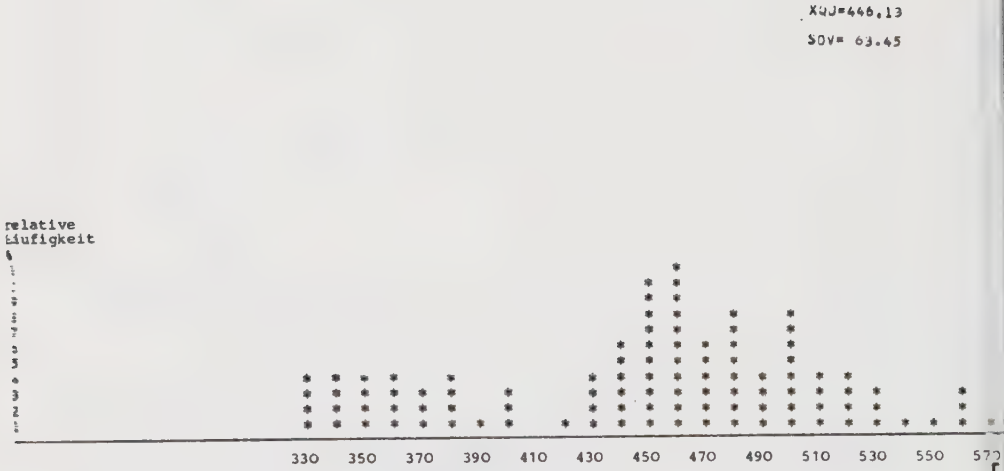


Abb. 3.2.5.1 - 4: Gegenwärtiger Zustand - Frühester Befundungsbeginn

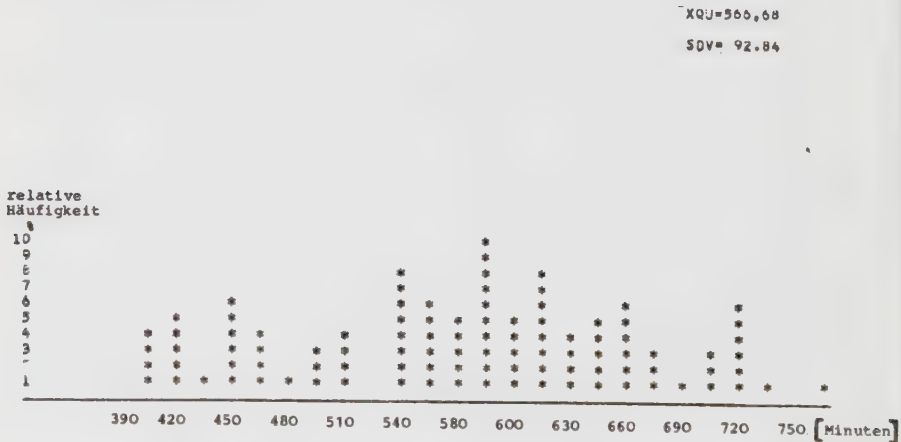


Abb. 3.2.5.1 - 5: Gegenwärtiger Zustand - Spätestes Befundungsende

XQJ=211,31

SDV=103,31

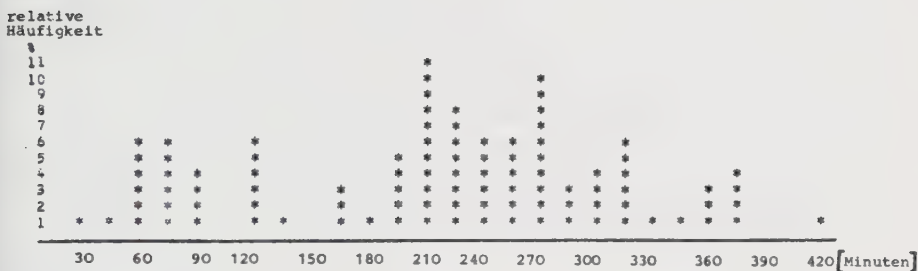


Abb. 3.2.5.1 - 6: Gegenwärtiger Zustand - Spätestes Ende des Befundschreibens

3.2.5.2 Erhöhung der Zahl der täglichen Anforderungen

Als erste Änderung wurde für alle Anforderungsarten 1 - 18 eine Erhöhung der mittleren, täglichen Anforderungszahlen um 10 % vorgenommen. Wie aus den Abb. 3.2.5.2 - 2 und 3.2.5.2 - 3 zu sehen ist, verändern sich mittlere Wartezeit und das Verhältnis Leerzeit zu Inanspruchnahme praktisch nicht. Dagegen steigt die Verweilzeit (Abb. 3.2.5.2 - 1) beträchtlich. Dies ist aufgrund des vorher erörterten Ablaufs nach der Untersuchung (Warten auf entwickelte Filme) erklärlich. Steigt die Zahl der Filme pro Röntgenraum, steigt auch die Belastung des Entwicklers. Die Folge ist, daß die MTA auf ihre Filme länger warten müssen.

Die übrigen Parameter zeigen, wie zu erwarten, erhöhte Mittelwerte. Allerdings liegt die Erhöhung jeweils deutlich unter 10 %. Dies rührt daher, daß eine 10 %-Erhöhung der Anforderungen, die lange Tätigkeitsdauern zur Folge haben, numerisch kaum ins Gewicht fällt. Praktisch bedeutet dies ledig-

lich eine Erhöhung der Anforderungen, die bisher schon häufig auftraten. Diese sind aber in der Regel mit kurzen Untersuchungsdauern verknüpft. Es zeigt sich jedoch, daß insbesondere das späteste Befundungsende im Mittel jetzt nahe bei 18.00 Uhr liegt (Abb. 3.2.5.2 - 5). Da überdies die Standard-Abweichung bei über 90 Minuten liegt, hätte die Erhöhung zur Folge, daß an ca. 16 % aller Arbeitstage für den Röntgenologen, der als letzter die Befundung seiner (sämtlichen) Bilder beendet hat, das effektive Arbeitsende nach ca. 19.30 liegt. Es ist anzunehmen, daß in diesem Fall eine Reihe von Befundungen erst am nächsten Tag oder später vorgenommen werden. Dies hätte eine unerwünschte Verlängerung der Liegedauer der Patienten in der Klinik zum Ergebnis.

$\bar{X}_{QU} = 108,85$

$SDV = 40,30$

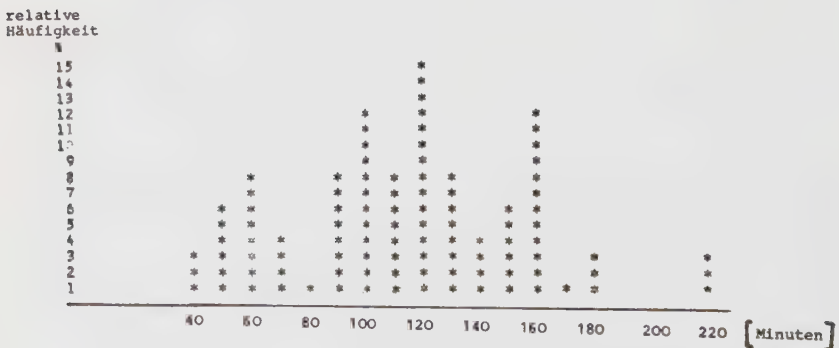


Abb. 3.2.5.2 - 1: Erhöhung der Zahl der Anforderungen -
Verweilzeit

XQ1 = 14.41

SDV = 10.60

ve
keit

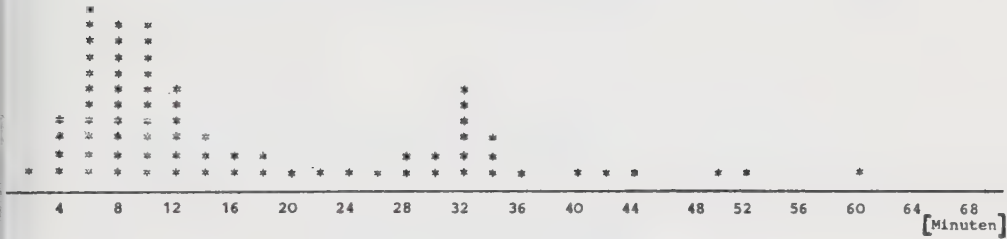


Abb. 3.2.5.2 - 2: Erhöhung der Zahl der Anforderungen -
Wartezeit

XQU = 0.17

SDV = 0.19

relative
häufigkeit

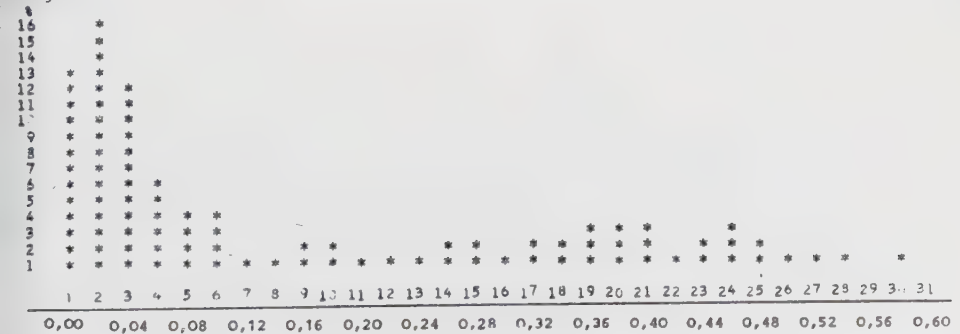


Abb. 3.2.5.2 - 3: Erhöhung der Zahl der Anforderungen -
Leerzeit/Inanspruchnahme

Röntgenraum	mittlere Wartezeit	mittlere relative Leerzeit
1	15,58	0,08
2	5,87	0,36
3	0,04	0,04
4	25,93	0,04
5	30,09	0,08
6	8,40	0,39

Tab. 3.2.5.2 - 1: Erhöhung der Zahl der Anforderungen -
Mittelwerte

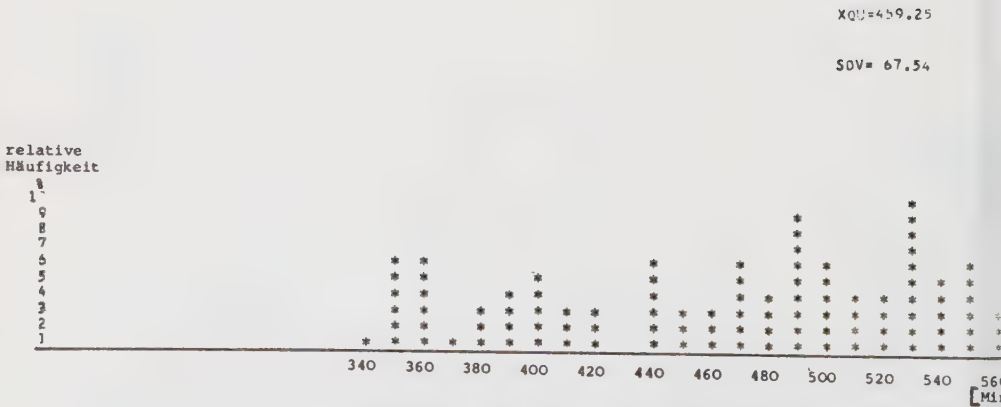


Abb. 3.2.5.2 - 4: Erhöhung der Zahl der Anforderungen -
frühester Befundungsbeginn

XQI=589.62

SDV= 96,40

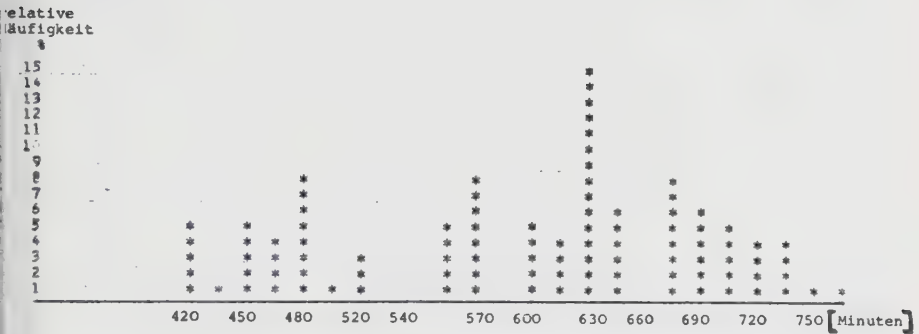


Abb. 3.2.5.2 - 5: Erhöhung der Zahl der Anforderungen -
spätestes Befundungsende

XQU=223.69

SDV=103.86

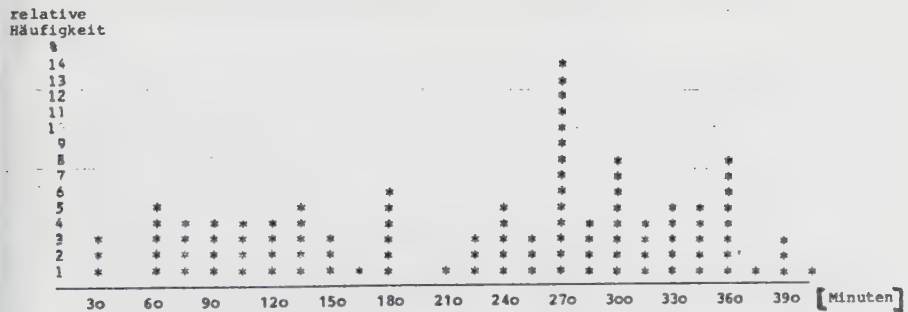


Abb. 3.2.5.2 - 6: Erhöhung der Zahl der Anforderungen -
spätestes Ende des Befundungsschreibens

3.2.5.3 Beschleunigung des Patientenankunftsprozesses

Wie in Abschnitt 3.2.2.3 erörtert wurde, ist für den gegenwärtigen Zustand der Röntgenabteilung angenommen, daß 90 % der Patienten nach Beendigung des Einbestellens in höchstens 11,5 Minuten in der Röntgenabteilung eintreffen. Es soll nun die Auswirkung einer Beschleunigung des Ankunftsprozesses untersucht werden (ohne Erhöhung der Anforderungszahlen). Dazu wird angenommen, daß 90 % der Patienten nach spätestens 5 Minuten in der Röntgenabteilung eintreffen. Dies bedeutet, daß die mittlere Ankunftsrate 0.471 beträgt. Die Abb. 3.2.5.3 - 1 bis 3.2.5.3 - 3 und Tab. 3.2.5.3 - 1 zeigen die Ergebnisse. Es ist plausibel, daß sich die Wartezeiten und die Verweilzeiten praktisch nur innerhalb der durch die Simulation bedingten zufälligen Schwankungen verändern.

Anders ist dies beim Verhältnis Leerzeit zu Inanspruchnahme (Abb. 3.2.5.3 - 3 und Tab. 3.2.5.3 - 1). Hier ist ein deutliches Absinken des Wertes dieses Quotienten zu verzeichnen. Das bedeutet, daß die ablaufbedingten Leerzeiten geringer geworden sind. Das bedeutet weiter, daß die theoretische Kapazität der Röntgenabteilung allein durch eine Maßnahme der Ablaufplanung erhöht wurde. Bei den übrigen Parametern ergaben sich wiederum nur zufallsbedingte Abweichungen von den Werten für den gegenwärtigen Zustand.

3.2.5.4 Quantitative Änderungen der Einbestellstrategien

Der Patientenfluß in die Röntgenabteilung wird durch den Einbestellprozeß der MTA in Gang gehalten. Die Zahl der jeweils einbestellten Patienten ist je nach Röntgenraum unterschiedlich. So wurde für den Durchleuchtungsraum 3 diese Zahl stets bei eins belassen, da dort nur sehr lange dauernde Untersuchungen vorgenommen werden. Diese Werte wurden nun variiert. Die jeweils in die Ausgangsversion 1 und in den Alternativen für die übrigen Röntgenräume verwendeten Zahlen sind in Tab. 3.2.5.4 - 1 zu finden. In einer Alternativ-Version 2 wurde die Zahl der pro Einbestellung von den Stationen abgerufenen

XQJ=102,75

SDV= 41.21

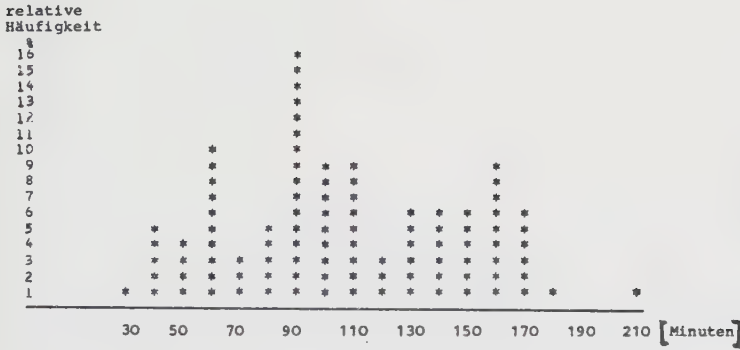


Abb. 3.2.5.3 - 1: Beschleunigung des Ankunftsprozesses - Verweilzeit

XQU= 13,68

SDV= 15.20

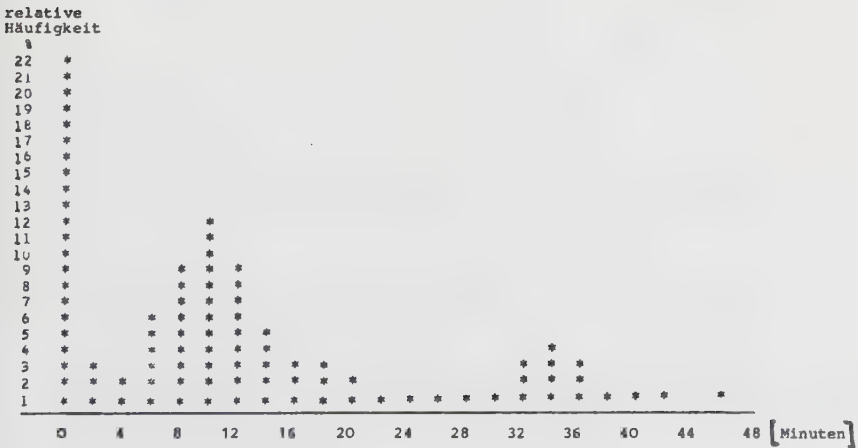


Abb. 3.2.5.3 - 2: Beschleunigung des Ankunftsprozesses - Wartezeit

X_{qj} = 0,13

SDV = 0,17

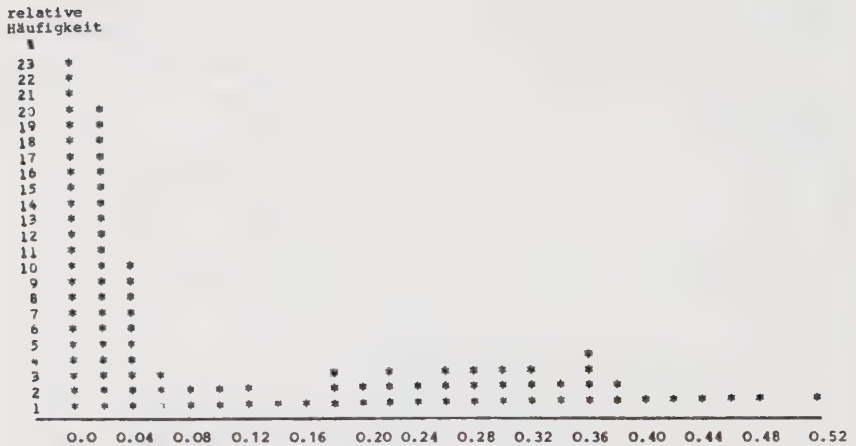


Abb. 3.2.5.3 - 3: Beschleunigung des Ankunftsprozesses -
Leerzeit/Inanspruchnahme

Röntgenraum	mittlere Wartezeit	mittlere relative Leerzeit
1	11,65	0,03
2	6,98	0,30
3	0,26	0,08
4	26,39	0,02
5	28,29	0,05
6	10,11	0,30

Tab. 3.2.5.3 -1: Beschleunigung des Ankunftsprozesses -
Mittelwerte

Patienten gegenüber der Ausgangsversion um 50 % reduziert.

Tab. 3.2.5.4 - 2 zeigt das Ergebnis bezüglich mittlerer Wartezeit und mittlerer relative Leerzeit. Danach sinkt die mittlere Wartezeit der Patienten um ca. 50 %, dagegen steigen die Leerzeiten beträchtlich an.

Röntgenraum	Version 1 gegenwärtiger Zustand	Version 2 50 % weniger Patienten	Version 3 100 % mehr Patienten
D1	2	1	4
D2	2	1	4
D3	1	1	1
A1	2	1	4
A2	2	1	4
A3	4	2	8

Tab. 3.2.5.4 - 1: Variation der Zahl der gleichzeitig einbestellten Patienten

Röntgenraum	mittlere Wartezeit	mittlere relative Leerzeit
1	12,73	0,07
2	1,26	0,75
3	0,13	0,08
4	22,32	0,08
5	2,64	0,47
6	1,27	0,77

Tab. 3.2.5.4 - 2: Senkung der Zahl der gleichzeitig einbestellten Patienten - Mittelwerte

In der Version 3 wurde die Zahl der Patienten pro Einbestellung gegenüber Version 1 um 100 % erhöht. Es stellte sich ein gegenüber Version 2 entgegengesetzter Effekt ein. Einerseits stieg die Wartezeit an, andererseits sank das Verhältnis Leerzeit zu Inanspruchnahme (Abb. 3.2.5.4 - 2 und 3.2.5.4 - 3, Tab. 3.2.5.4 - 3). Gegenüber der Version 1 (Ausgangsversion) ergab sich auch eine deutlich geringere Verweildauer (Abb. 3.2.5.4 - 1).

Die Ergebnisse der Versionen 2 und 3 sind leicht erklärlich. Ein Ansteigen der Patientenzahl hat nämlich weniger Unterbrechungen von Untersuchungsreihenfolge zur Folge. Damit treten weniger Leerzeiten auf. Zudem sind natürlich weniger Ein-

$\bar{X}_{QJ} = 94,50$

$SD_V = 39,90$

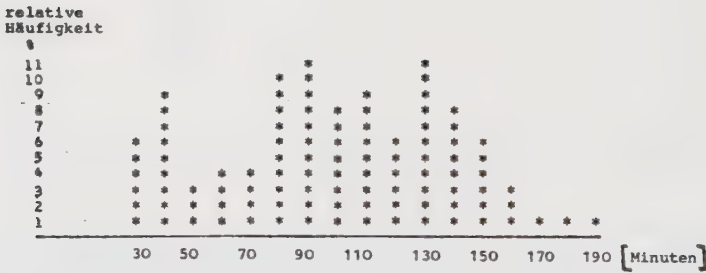


Abb. 3.2.5.4 - 1: Erhöhung der Zahl der gleichzeitig einbestellten Patienten - Verweilzeit

$\bar{X}_{QJ} = 18,12$

$SD_V = 18,80$

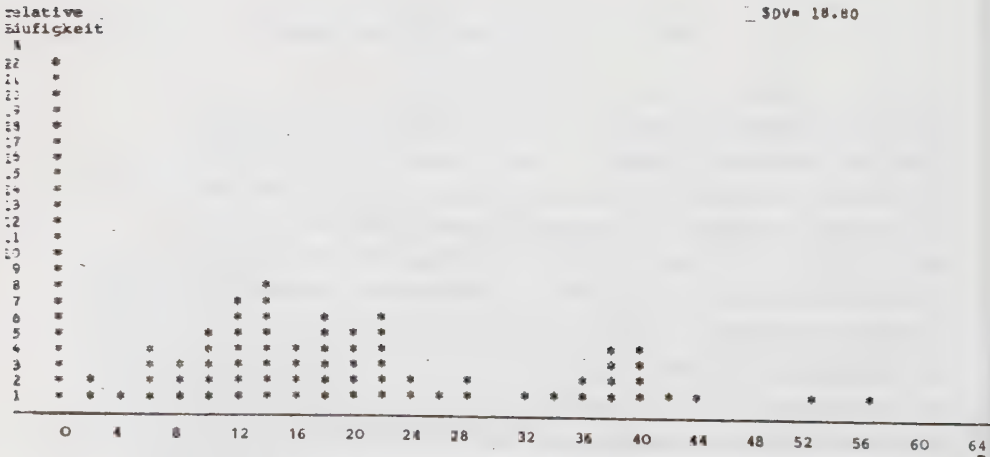


Abb. 3.2.5.4 - 2: Erhöhung der Zahl der gleichzeitig einbestellten Patienten - Wartezeit

$\bar{x}_{QJ} = 0,10$

$SD_v = 0,13$

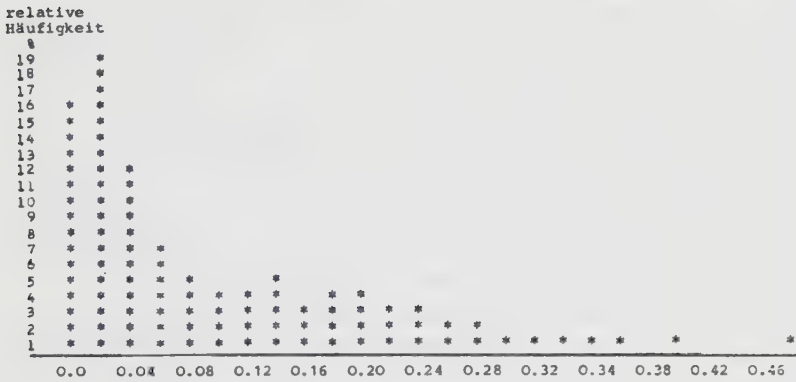


Abb. 3.2.5.4 - 3: Erhöhung der Zahl der gleichzeitig einbestellten Patienten - Leerzeit/Inanspruchnahme

Röntgenraum	mittlere Wartezeit	mittlere relative Leerzeit
1	13,77	0,08
2	10,41	0,21
3	0,03	0,06
4	30,96	0,03
5	40,99	0,06
6	16,92	0,18

Tab. 3.2.5.4 - 3: Erhöhung der Zahl der gleichzeitig einbestellten Patienten - Mittelwerte

bestellvorgänge pro Arbeitstag notwendig. Diese beiden Konsequenzen verkürzen insgesamt die Verweilzeit pro Patient in der Röntgenabteilung. Sinken die Leerzeiten, wird auch der Quotient Leerzeiten durch Inanspruchnahme bei gleicher Anzahl der Anforderungen pro Tag kleiner.

Eine Verminderung der Zahl der einbestellten Patienten hat

demgemäß den entgegengesetzten Effekt. Daraus läßt sich der Schluß ziehen, daß eine behutsame Erhöhung der Zahl der Patienten pro Einbestellung für den Arbeitsablauf der Röntgenabteilung insgesamt gesehen, von Vorteil wäre. Allerdings sind hier zwei Probleme zu beachten: In der Version 3 wächst die Wartezeit der Patienten stark an. Nimmt man noch die Zeit für den Weg von der Station zur Röntgenstation, die bei bestimmten Patienten recht lang sein kann, zur Wartezeit hinzu und das Warten auf die Sofortbetrachtung, so ergeben sich beträchtliche, dem Heilungsprozeß nicht förderliche Zeiten, die der Patient allein für eine medizinische Tätigkeit unterwegs ist, die vergleichsweise wenig Zeit in Anspruch nimmt. Es ist ferner zu überlegen, daß bei der Betrachtung der Röntgenabteilung völlig vernachlässigt wird, daß der Patient sich auch noch in anderen Leistungsstellen einfinden soll. Das bedeutet, daß die Zeit, die für die Erstellung einer Leistung aufgewendet wird, in Relation zum gesamten medizinischen Programm, das für einen Patienten pro Tag durchläuft, gesehen werden muß. Dann kann es unter Umständen durchaus sinnvoll sein, etwas mehr Leerzeiten in einer Leistungsstelle in Kauf zu nehmen, wenn dafür sichergestellt ist, daß das medizinische Programm des Patienten am vorgesehenen Tag erledigt werden kann.

Es hätte nun nahegelegen, Änderungen des zeitlichen Schwellwertes für den Einbestellvorgang zu studieren (erwartete Dauer für die Abarbeitung der wartenden Patienten). Da dies bei fester Zahl der einbestellten Patienten naturgemäß auf dieselben - gerade erörterten Ergebnisse geführt hätte, wurde der Variation der Patientenzahl der Vorzug gegeben, weil ein zeitlicher Schwellwert, der sich auf individuelle Schätzungen eines Mittelwertes stützt, sehr viel weniger als Grundlage einer Handlungsanleitung geeignet ist.

3.2.5.5 Änderungen der Einbestellstrategien bezüglich der Dauer der Untersuchungen

Wie in Abschnitt 3.2.2.3 schon erwähnt, werden gegenwärtig in der Regel die Patienten, sofern sie nicht Notfälle sind bzw. ambulante Privatpatienten, willkürlich von den Stationen abgerufen. Sind sie im Wartezimmer eingetroffen, so wird der Patient, der als erster eingetroffen ist, als erster untersucht. Dabei sind Abweichungen in geringem Umfang möglich, da die MTA u.U. sich nicht erkundigt, wer der Nächste ist.

In der Sprache der Ablaufplanung herrscht damit angenähert eine FIFO-Prioritätsregel bezüglich der Patienten. Bezieht man sich dagegen auf die Dauer der Untersuchung, die für einen Patienten voraussichtlich aufzuwenden ist, so muß man von einer RANDOM-Regel sprechen, da hier zufallsabhängig ausgewählt wird. Diese Kombination von Prioritätsregeln ist programmtechnisch so realisiert, daß durch die programminterne Steuerung die Patienten willkürlich bezüglich ihrer Untersuchungsdauer gemischt, zur Einbestellung anstehen. Im weiteren Verlauf des Programms wird dann in der Ausgangsversion grundsätzlich eine FIFO-Regel verwendet. Es findet sich in der Literatur eine große Zahl von teilweise komplexen Prioritätsregeln, wobei es sich gezeigt hat, daß allgemeine Aussagen bezüglich der Güte einzelner Regeln nicht gemacht werden können.¹⁾ Darüber hinaus stellt die Röntgenabteilung, betrachtet man nur die Einzelleistung Röntgenuntersuchung, ein besonders einfaches System dar, da pro "Auftrag" nur eine Tätigkeit auf einem Gerät ausgeführt wird und die 6 Geräte lediglich über die Rückwirkungen des Entwicklers miteinander gekoppelt sind.

Es kann daher, wie schon erwähnt, auf Prioritätsregeln wie SRT (shortest remaining time), LRT (longest remaining time) usw. von vornherein verzichtet werden. Zudem sind nur solche Regeln sinnvollerweise zu untersuchen, die auch vom Personal der Röntgenabteilung im Routinebetrieb angewandt werden kön-

1) Dörken (1973), S. 118.

nen. Dazu gehören neben RANDOM und FIFO die Prioritätsregeln SOT (shortest operation time) und LOT (longest operation time).

Der erste Fall bedeutet, daß die Untersuchungen mit der kürzeren erwarteten Dauer bevorzugt einbestellt werden. Der Fall der LOT-Regel stellt die Bevorzugung von längerdauernden Untersuchungen dar. Die Simulationsergebnisse für die LOT-Regel sind aus den Abb. 3.2.5.5 - 1 bis 3.2.5.5 - 3 und Tab. 3.2.5.5 - 1 zu entnehmen. Es zeigt sich, daß Verweilzeit und Wartezeit gegenüber der Ausgangsversion leicht sinken und die Leerzeiten annähernd unverändert sind.

XQJ = 97,63

SDV = 37,00

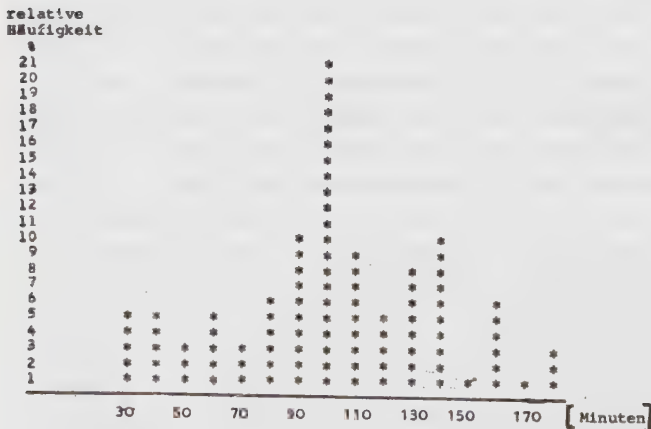


Abb. 3.2.5.5 - 1: LOT-Regel - Verweilzeit

Demgegenüber ist bei der SOT-Regel Konstanz bezüglich der Verweilzeit und Wartezeit, aber eine Verminderung der Leerzeiten festzustellen (Abb. 3.2.5.5 - 4 bis 3.2.5.5 - 6 und Tab. 3.2.5.5 - 2). Welcher der Regeln der Vorzug zu geben ist, hängt von der Gesamtsituation des Krankenhauses ab.

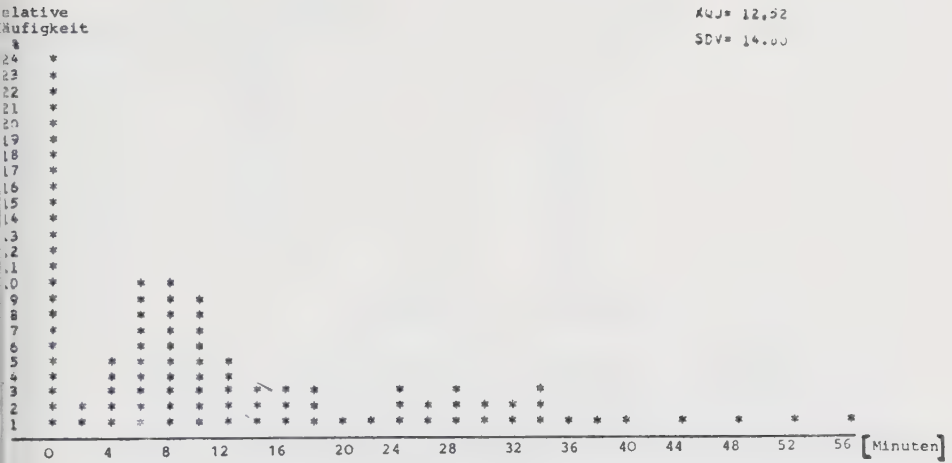


Abb. 3.2.5.5 - 2: LOT-Regel - Wartezeit

AKJ = 0.17

SDV = 0.20

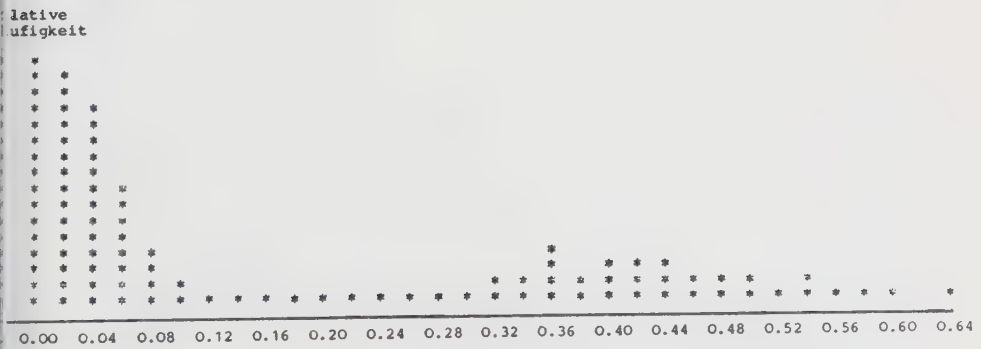


Abb. 3.2.5.5 - 3: LOT-Regel - Leerzeit / Inanspruchnahme

Röntgenraum	mittlere Wartezeit	mittlere relative Leerzeit
1	14,21	0,09
2	5,38	0,41
3	0,05	0,03
4	23,43	0,04
5	25,43	0,08
6	8,21	0,39

Tab. 3.2.5.5 - 1: LOT-Regel - Mittelwerte

Beim gegenwärtigen Stand der hohen Belastung des Personals ist es sinnvoller, die Leerzeiten abzubauen, was zu einer Reduktion der Gesamtinanspruchnahme führt. Überdies besteht noch die Möglichkeit, mehr Patienten pro Tag zu untersuchen. Andererseits würde eine Verminderung von Wartezeit und Verweilzeit, wie oben erwähnt, unter Umständen den Ablauf des medizinischen Programms für einen Patienten günstig beeinflussen.

Da die Röntgenabteilung von der Krankenhausleitung als Engpass angesehen wurde, erschien es zweckmäßig, für die nachfolgenden Alternativversionen die SOT-Regel zugrunde zu legen.

$$X_{01} = 107,06$$

$$SDV = 40,16$$

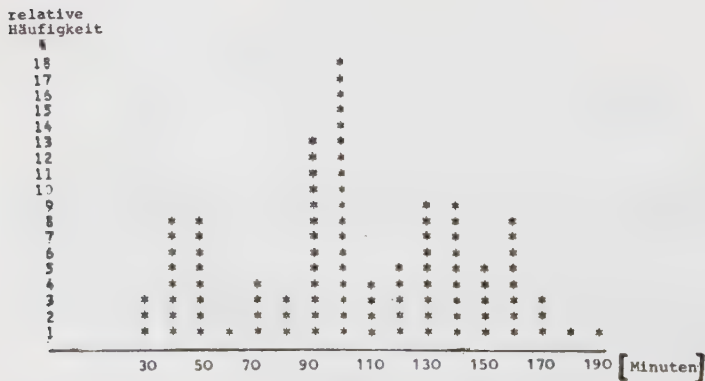


Abb. 3.2.5.5 - 4: SOT-Regel - Verweilzeit

relative
Häufigkeit

$XQ' = 14.82$

$SDV = 16.11$

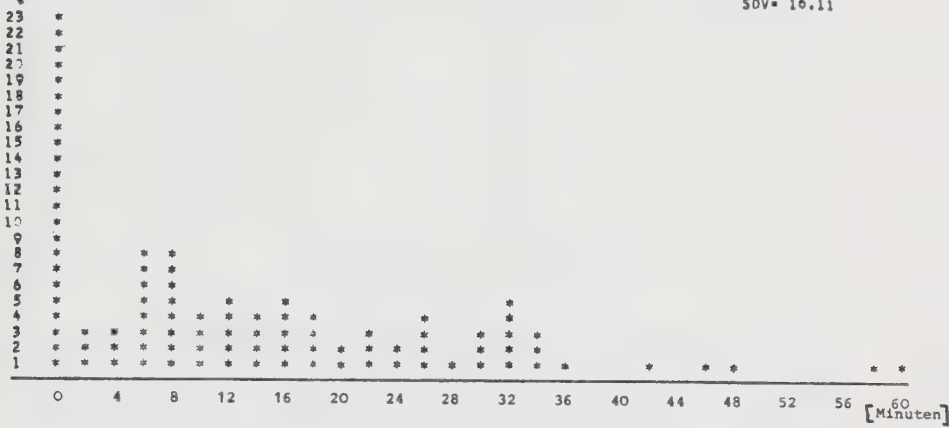


Abb. 3.2.5.5 - 5: SOT-Regel - Wartezeit

$XQ = 0.14$

$SDV = 0.17$

relative
Häufigkeit

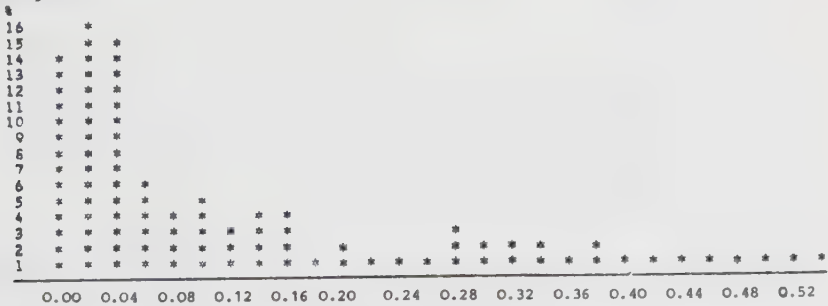


Abb. 3.2.5.5 - 6: SOT-Regel - Leerzeit / Inanspruchnahme

Röntgenraum	mittlere Wartezeit	mittlere relative Leerzeit
1	14,16	0,08
2	5,94	0,38
3	0,08	0,05
4	24,67	0,04
5	29,94	0,04
6	14,88	0,22

Tab. 3.2.5.5 - 2: SOT-Regel - Mittelwerte

3.2.5.6 Kombination der günstigsten Strategiealternativen

Es ist nun zu untersuchen, welche Wirkung eine Kombination der günstigsten Alternativen auf die Ergebnisparameter hat (Abb. 3.2.5.6 - 1 bis 3.2.5.6 - 3 und Tab. 3.2.5.6 - 1).

Diese Kombination besteht aus der Erhöhung der Zahl der gleichzeitig einbestellten Patienten, der Beschleunigung des Patientenankunftsprozesses und der SOT-Regel.

Während, wie in Abb. 3.2.5.6 - 1 zu sehen ist, die Wartezeit der Patienten stark ansteigt, vermindern sich Verweilzeit und Leerzeiten deutlich. Der Mittelwert des Quotienten Leerzeit zu Inanspruchnahme wird fast auf 1/3 des Wertes der Ausgangsversion gesenkt.

Der Anstieg der Wartezeit ist dabei vor allem auf die Erhöhung der Zahl der einbestellten Patienten zurückzuführen. Darüber hinaus sind keine wartezeitsenkenden Strategien in der günstigsten Strategiekombination. Es ergäbe sich ein anderes Bild, wenn die LOT-Regel gewählt worden wäre.

Röntgenraum	mittlere Wartezeit	mittlere relative Leerzeit
1	13,97	0,03
2	11,37	0,15
3	0,17	0,06
4	32,11	0,03
5	38,10	0,04
6	24,91	0,11

Tab. 3.2.5.6 - 1: Strategiekombination - Mittelwerte

$\bar{X}_{QU} = 92,56$

$SDV = 34,83$

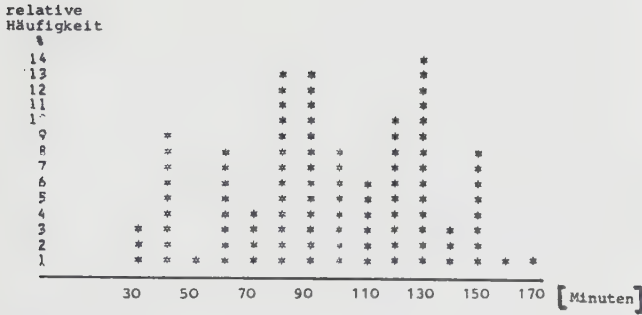


Abb. 3.2.5.6 - 1: Strategiekombination - Verweilzeit

$\bar{X}_Q = 20,50$

$SDV = 19,58$

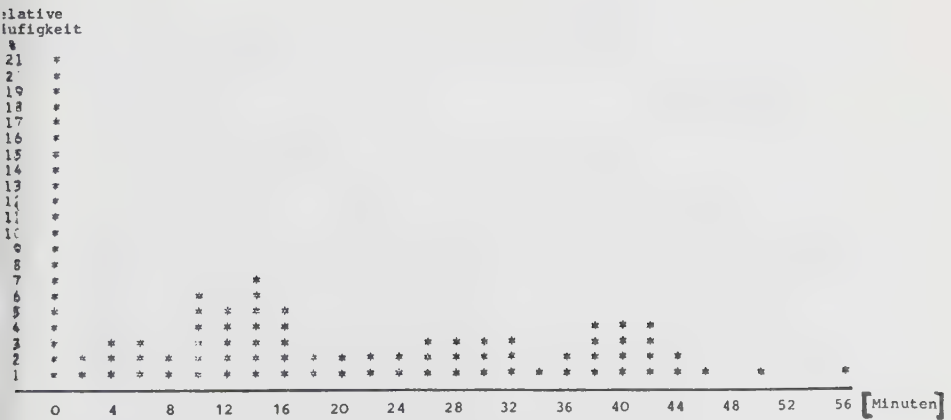


Abb. 3.2.5.6 - 2: Strategiekombination - Wartezeit

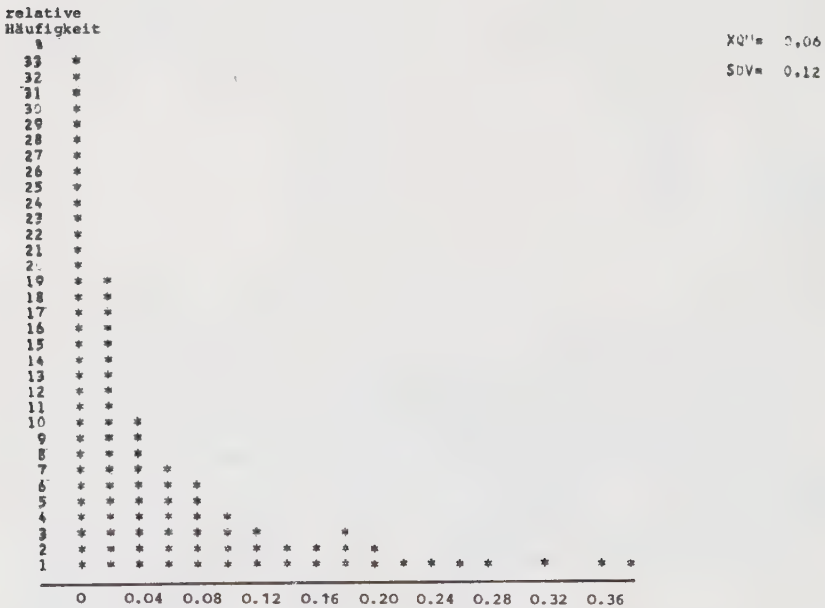


Abb. 3.2.5.6 - 3: Strategiekombination - Leerzeit / Inanspruchnahme

3.2.5.7 Die Wirkung struktureller Änderungen am Beispiel des Sortieren 2

Wie aus Abschnitt 3.2.2.3 ersichtlich, stellt das Sortieren 2 einen Engpass im täglichen Arbeitsablauf der Röntgenabteilung dar, da sämtliche Anforderungen über einen Arbeitsplatz laufen müssen und die Tätigkeit ohne großen finanziellen Aufwand und starke Eingriffe in den Arbeitsablauf nicht realisiert werden kann. Erschwerend kommt noch die aktuelle Personalsituation hinzu, die sich darin ausdrückt, daß der Sortierplatz erst nachmittags besetzt werden kann. Es ist ersichtlich, daß eine durchgehende Besetzung dieses Arbeitsplatzes einschneidende Konsequenzen hätte. Damit wäre nämlich die Möglichkeit eröffnet, den frühesten Befundungsbeginn auf

ca. 13.00 Uhr festzusetzen, wodurch das tägliche Arbeitsende der Röntgenologen früher liegen würde. Zusätzlich wäre es sinnvoll, sobald Befundungen auf Tonband gesprochen sind, das Schreiben der Befunde anzuschließen. Dies würde bedeuten, daß die Befunde schon am nächsten Morgen auf den Stationen sein könnten. Die Ausgangsversion des Modells wurde dementsprechend umgearbeitet. Allerdings bedeutet die Annahme eines Befundungsbeginn um 13.00 Uhr eine leichte Vergrößerung der sich wohl tatsächlich einstellenden Verhältnisse, da es manchmal vorkommen wird, daß der eine oder andere Arzt auch am Nachmittag eine Untersuchung vorzunehmen hat. Ebenso ist das unmittelbar folgende Befundungsschreiben wohl nicht einzuhalten, da die Tonbänder sicher nicht nach jeder Befundung ins Schreibbüro transportiert werden.

Dennoch sind aus den Simulationsläufen des so abgeänderten Modells wichtige Hinweise auf die Effizienz dieser strukturellen Änderung zu gewinnen. Hierzu wurden sämtliche Eingabeparameter auf die Werte der Ausgangsversion gesetzt.

Die Ergebnisse sind in den Abb. 3.2.5.7 - 1 und 3.2.5.7 - 2 zu sehen.

Die Ergebnisparameter Verweildauer, Wartezeit und Leerzeit zu Inanspruchnahme sind selbstverständlich bis auf Zufallsabweichungen mit denen des Ausgangszustandes der Röntgenabteilung identisch.

Der Parameter frühester Beginn des Befundens ist hier ohne Bedeutung, da er im Modell auf 13.00 Uhr fixiert ist. Das späteste Befundungsende zeigt jedoch gegenüber Abb. 3.2.5.1 - 5 einendeutlich niedrigeren Mittelwert von ca. 15.30 Uhr. Allerdings ist damit der Arbeitstag der Ärzte nicht beendet, da dann jene Tätigkeiten erfolgen, die in der Ausgangsversion bis zum frühesten Befundungsbeginn ausgeführt werden mußten. Das Ergebnis für das späteste Ende des Befundschreibens ist mit den bisherigen Ergebnissen nicht vergleichbar, da diese sich nun auf den Tag der Untersuchung beziehen und unter veränderten Bedingungen (Einzelankünfte) zustande kommen.

$\bar{x} = 44,75$

$SDV = 52,24$

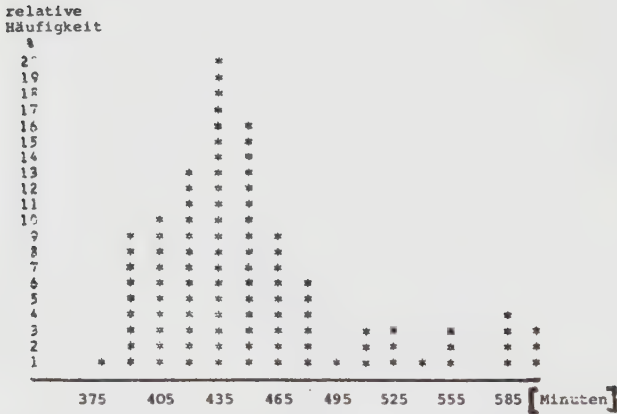


Abb. 3.2.5.7 - 1: Sortieren 2 am Vormittag - spätestes Befundungsende

$\bar{x} = 566,81$

$SDV = 93,82$

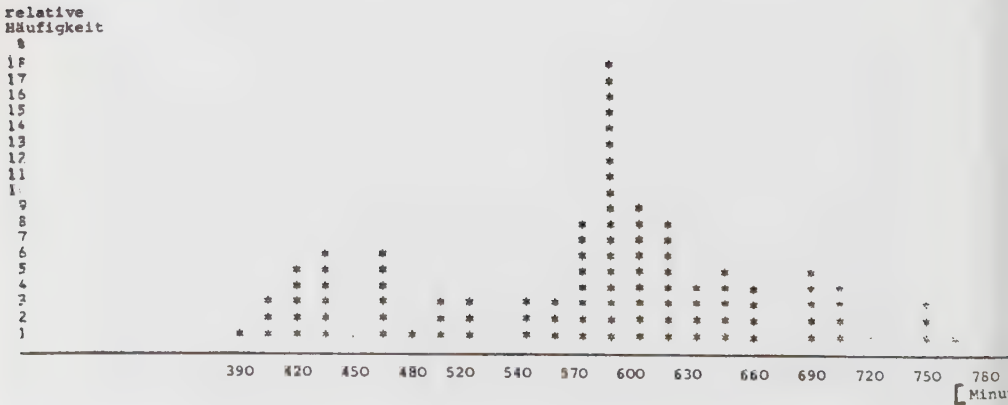


Abb. 3.2.5.7 - 2: Sortieren 2 am Vormittag - spätestes Ende des Befundschreibens

Abb. 3.2.5.7 - 2 macht deutlich, daß realistischerweise nachmittags entweder nur ein Teil der Befunde geschrieben werden und der Rest wie in der Ausgangsversion am nächsten Vormittag oder daß das Schreiben der Befunde erst am Spätnachmittag einsetzt. Hierbei stellt sich jedoch die Frage, ob eine derartige Arbeitszeit (Vormittag und später Nachmittag bis Abend) zumutbar ist. Denkbar wäre auch eine Kombination dieser beiden Möglichkeiten.

3.2.5.8 Kombination der günstigsten Strategien und des Vorverlegens von Sortieren 2

Faßt man nun die günstigsten Strategieänderungen sowie die strukturelle Änderung des Modells bezüglich des Sortieren 2 zusammen, so ergibt sich eine Änderung des Arbeitsablaufes in der Röntgenabteilung, die ohne schwerwiegende Eingriffe zu verwirklichen wäre, sieht man von den zusätzlichen Personalkosten ab. In den Abb. 3.2.5.8 - 1 bis 3.2.5.8 - 5 und Tab. 3.2.5.8 - 1 sind die Ergebnisse der Simulationsläufe zusammengefaßt. Sie entsprechen denen der einzelnen Alternativen bis auf zufällige Abweichungen.

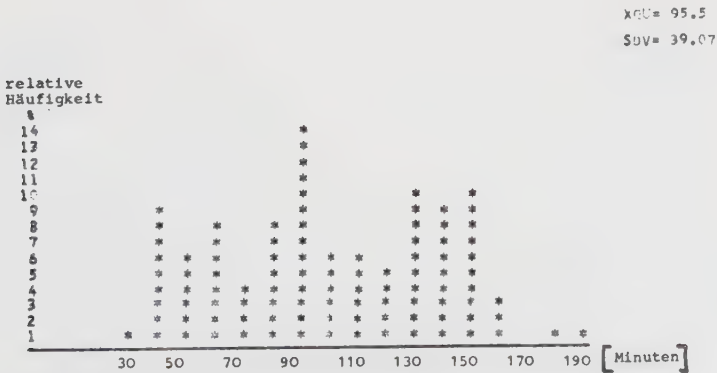


Abb. 3.2.5.8 - 1: Strategiekombination und Sortieren 2 am Vormittag - Verweilzeit

$\bar{X}_{0.5} = 28.89$

$SDV = 28.84$

relative
Häufigkeit

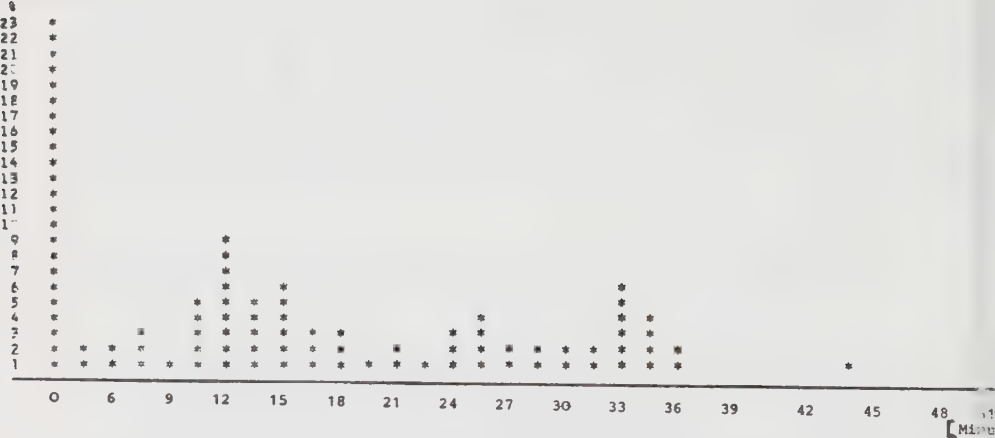


Abb. 3.2.5.8 - 2: Strategiekombination und Sortieren 2 am Vormittag - Wartezeit

relative
Häufigkeit

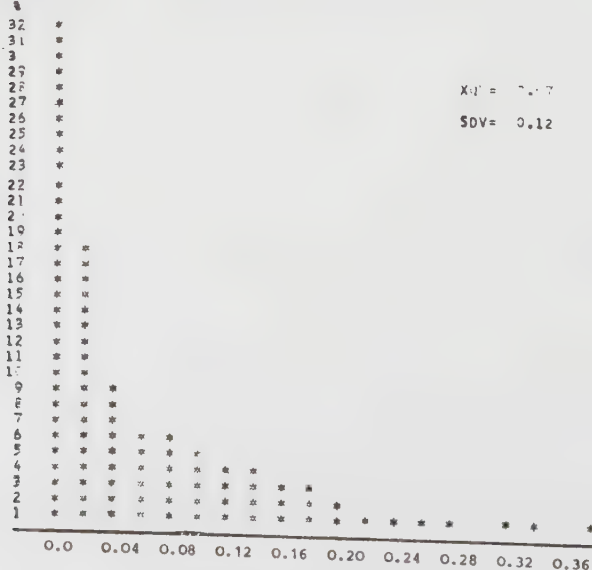


Abb. 3.2.5.8 - 3: Strategiekombination und Sortieren 2 am Vormittag - Leerzeit / Inanspruchnahme

Röntgenraum	mittlere Wartezeit	mittlere relative Leerzeit
1	13,97	0,03
2	11,37	0,15
3	0,17	0,06
4	32,11	0,03
5	38,10	0,04
6	24,91	0,11

Tab. 3.2.5.8 - 1: Strategiekombination und Sortieren 2 am
Vormittag - Mittelwerte

$\bar{x}_{rel} = 447,44$

$SDV = 52,00$

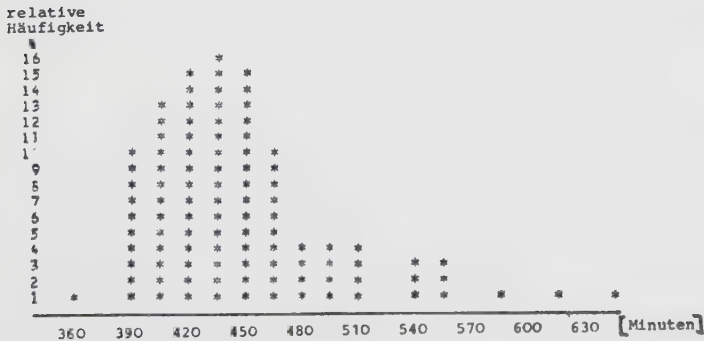


Abb. 3.2.5.8 - 4: Strategiekombination und Sortieren 2 am
Vormittag - Spätestes Befundungsende

$$\bar{x} = 506,67$$

$$s_{\bar{x}} = 97,03$$

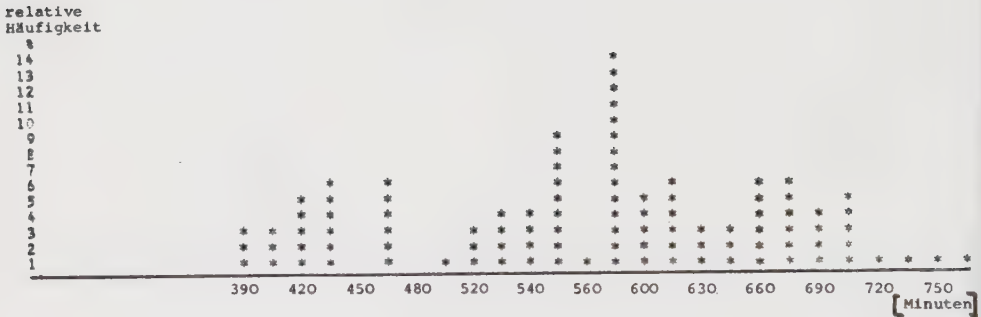


Abb. 3.2.5.8 - 5: Strategiekombination und Sortieren 2 am Vormittag - Spätestes Ende des Befundschreibens

3.2.5.9 Erhöhung der Zahl der täglichen Anforderungen bei abgeändertem Modell

Es sollen für den Fall der obigen Kombination schließlich die Auswirkungen einer 10 %-Erhöhung des Mittelwertes der täglichen Anforderungen betrachtet werden (Abb. 3.2.5.9 - 1 bis 3.2.5.9 - 5 und Tab. 3.2.5.9 - 1). Sie führten dort zu einer Erhöhung der Verweilzeit und einem späteren Arbeitsende der Röntgenologen gegenüber der Ausgangsversion.

Auch im Fall der Erhöhung mit den Modelländerungen des obigen Abschnitts stellen sich höhere Verweilzeiten und spätere Befundungsende und Ende des Befundschreibens ein. Außerdem hat sich die Wartezeit stark gegenüber der Ausgangsversion verlängert. Dem steht jedoch gegenüber, daß ein größerer Anforderungsanfall mit einer Patientenverweildauer bewältigt werden kann, die praktisch gleich der Ausgangsversion ist. Das Verhältnis Leerzeit zu Inanspruchnahme beträgt etwa 1/3 des Wertes der ursprünglichen Version.

$XQ' = 102,25$

$SDV = 44,27$

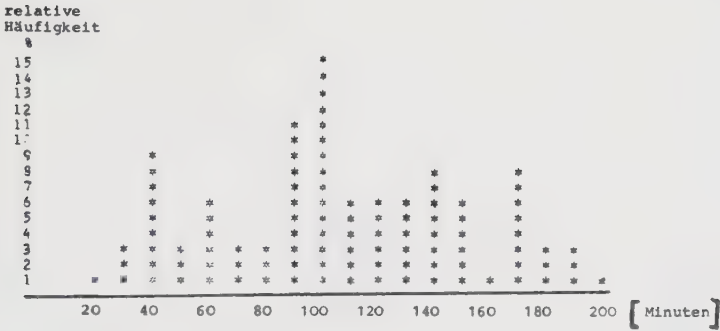


Abb. 3.2.5.9 - 1: Geändertes Modell und Anforderungserhöhung
- Verweilzeit

$X_1 = 12,50$

$SDV = 37,50$

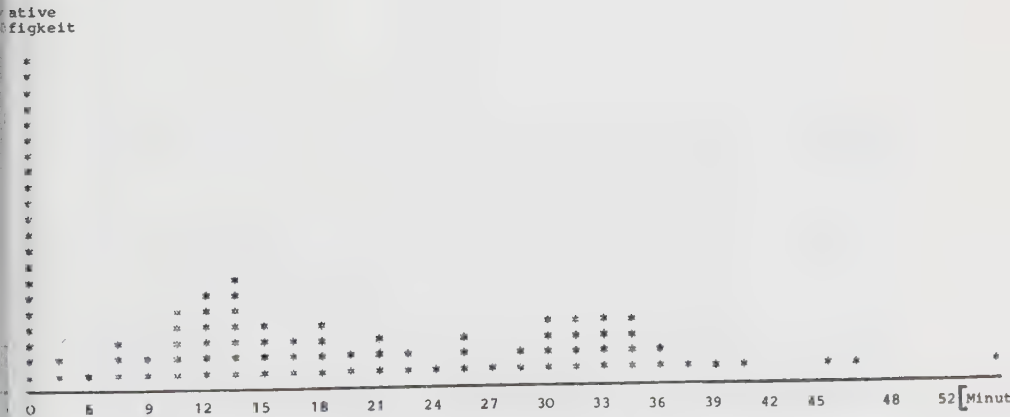


Abb. 3.2.5.9 - 2: Geändertes Modell und Anforderungserhöhung
- Wartezeit

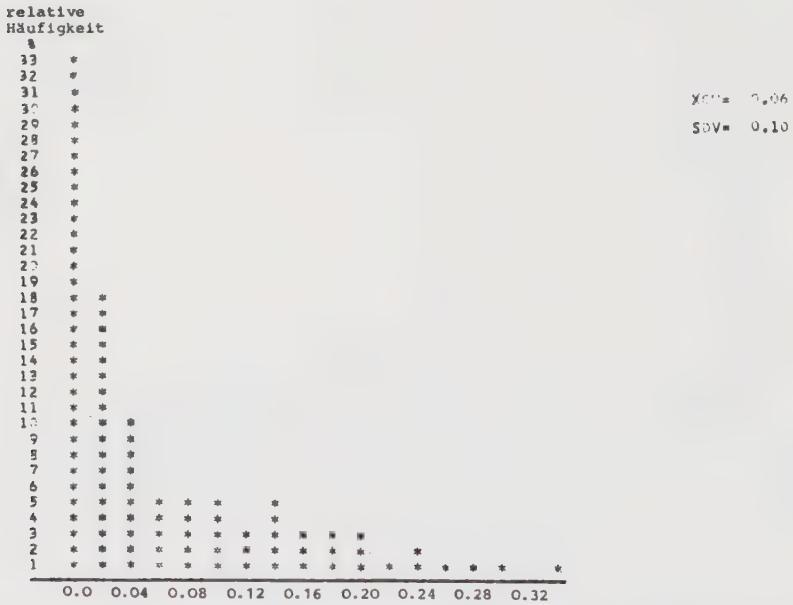
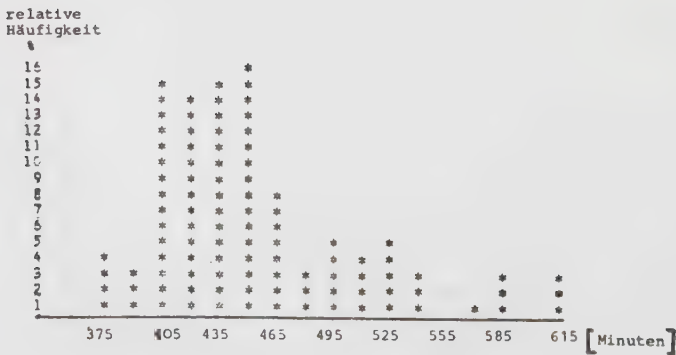


Abb. 3.2.5.9 - 3: Geändertes Modell und Anforderungserhöhung
- Leerzeit / Inanspruchnahme

$\bar{X}_{rel} = 446.40$

$SDV = 53.80$



Tab. 3.2.5.9 - 1: Geändertes Modell und Anforderungserhöhung -
Mittelwerte

$$\bar{x} = 511,2$$

$$SDV = 107,00$$

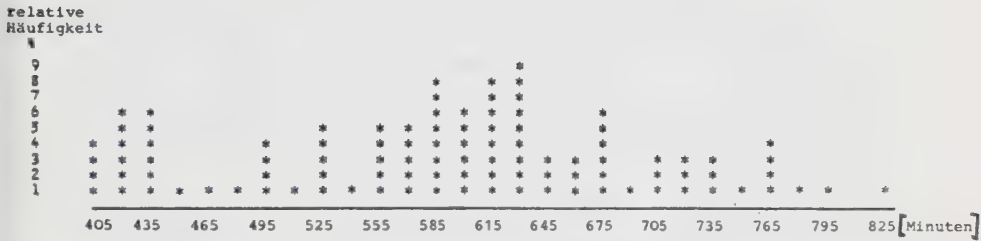


Abb. 3.2.5.9 - 4: Geändertes Modell und Anforderungserhöhung
- spätestes Befundungsende

Röntgenraum	mittlere Wartezeit	mittlere Kapazitätsauslastung
1	14,13	0,03
2	12,10	0,15
3	0,20	0,06
4	31,53	0,02
5	46,72	0,04
6	28,58	0,10

Abb. 3.2.5.9 - 5: Geändertes Modell und Anforderungserhöhung
- spätestes Ende des Befundungsschreibens

3.2.5.10 Abschätzung der Ergebnisse unter Berücksichtigung von Krankheit bzw. Urlaub des Personals

Wie oben erwähnt, wurden Erkrankungen bzw. Urlaub des Personals der Röntgenabteilung nicht direkt im Modell berücksichtigt. Allerdings läßt sich aufgrund der oben erläuterten Ergebnisse eine Abschätzung der Auswirkung eines dadurch entstehenden zusätzlichen Personalengpasses angeben. In Abschnitt

3.2.2.3 wurde bereits angeführt, daß bei Ausfall beispielsweise einer MTA eine andere MTA abwechselnd zwei Arbeitsplätze zu besetzen hat. Das bedeutet, daß sich die Warteschlange der Patienten vor einem Röntgenraum um die Zahl der wartenden Patienten vor dem Röntgenraum erhöht, den die MTA mitversorgen muß. Damit addieren sich auch Wartezeit und relative Leerzeit. Das bedeutet, daß die Verteilungen der Wartezeiten bzw. relativen Leerzeiten zweier Röntgenräume gefaltet werden müssen, um die Verteilung der Summen zu erhalten. Formal wird die Operation wie folgt geschrieben:

$$(3.2.5.10 - 1) \quad F = F_1 * F_2$$

In Beziehung (3.2.5.10 - 1) sind F_1 und F_2 die Verteilungsfunktionen der Kenngrößen der beiden parallel versorgten Röntgenräume, F ist die resultierende Verteilung. Da jedoch die oben beschriebenen Ergebnisse einerseits Verteilungen ergeben, die nicht nach Röntgenräumen untergliedert sind, andererseits eine derartige Untergliederung lediglich für mittlere Wartezeiten und mittlere Kapazitätsauslastungen vorgenommen wurden, kann hier nur Erwartungswert (und Varianz) der Verteilung F mit dem Satz von der Addition der Erwartungswerte bestimmt werden:

$$(3.2.5.10 - 2) \quad E(t) = E(t_1) + E(t_2) = E(t_1 + t_2)$$

Dabei bedeuten $E(t_1)$ und $E(t_2)$ z.B. die Erwartungswerte der Wartezeit vor zwei Röntgenräumen. $E(t)$ ist der resultierende Erwartungswert, der sich aus der Addition der Wartezeiten ergibt. Als konkretes Beispiel sollen nun die Werte aus Tab. 3.2.5.1 - 1 für die Röntgenräume 5 und 6 verwendet werden. Die resultierende mittlere Wartezeit beträgt dann 38.21, die resultierende, mittlere, relative Leerzeit 0.44. Dem entsprechend steigt selbstverständlich auch die Verweilzeit der Patienten in der Röntgenabteilung. Analog könnte bei der Abschätzung der Auswirkungen von Erkrankungen und Urlaub auf die Zeiten des spätesten Befundungsendes bei Ausfall eines Arztes vorgegangen werden.

Entsprechendes gilt für die Varianz der resultierenden Verteilung F.

3.2.6 Konsequenzen für die Medizinische Klinik

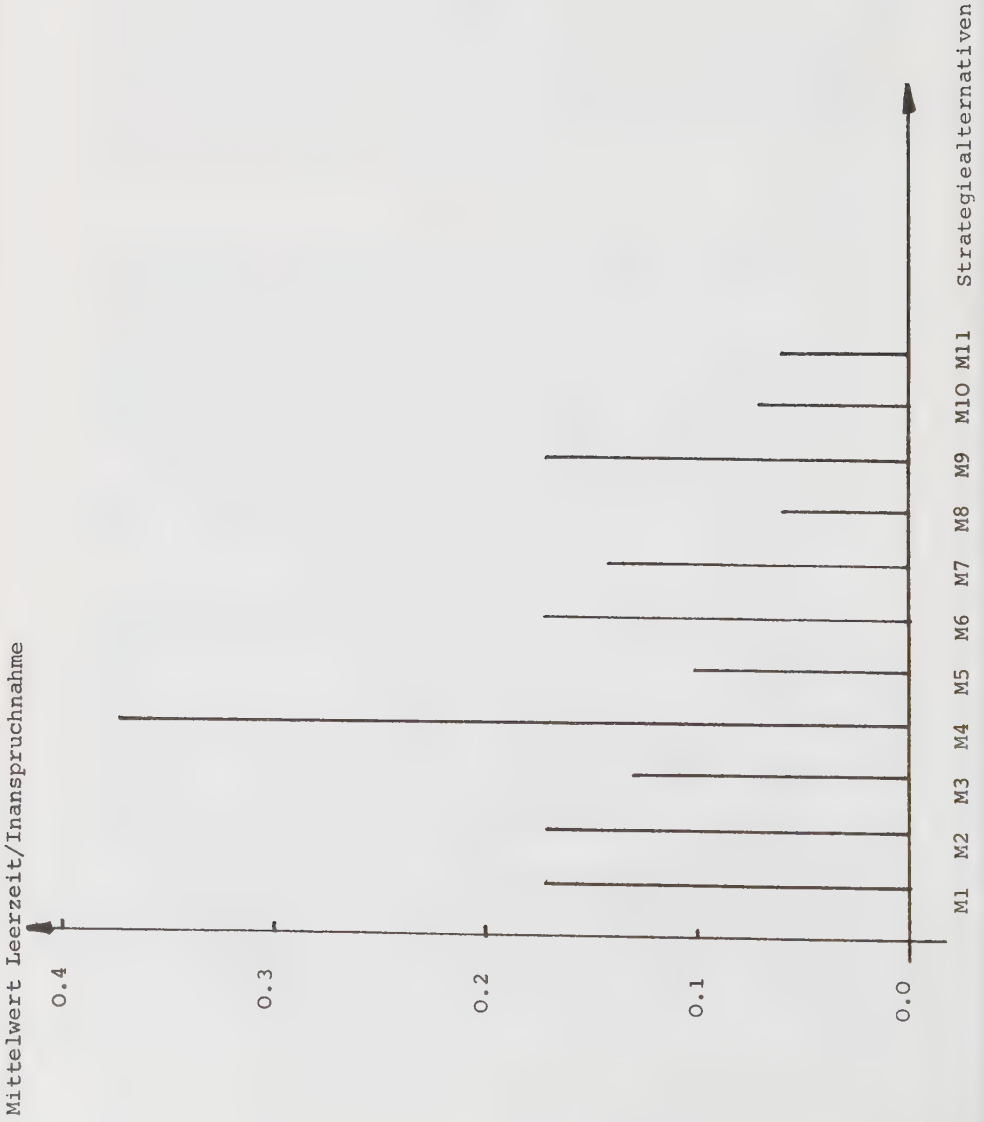
Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse ergeben sich einige Möglichkeiten, den Arbeitsablauf ohne drastische Eingriffe so abzuändern, daß auch einem erhöhten Anforderungsanfall Rechnung getragen werden kann. Abb. 3.2.6 - 1 stellt für das Beispiel des Mittelwertes des Parameters Leerzeit / Inanspruchnahme die entsprechenden Werte der Strategiealternativen zusammen. Die Beziehung dieser Modelle ist Tab. 3.2.6 - 1 zu entnehmen.

Der Entscheidende hat damit die Möglichkeit ihm ungünstig erscheinende Alternativen auszusortieren.

Bei wünschenswerten Strategien ist der Nutzen gegen die Kosten abzuwägen.

- M1 = gegenwärtiger Zustand
- M2 = gegenwärtiger Zustand und Erhöhung der Zahl der Anforderungen
- M3 = Beschleunigung des Patientenankunftsprozesses
- M4 = Senkung der Zahl der gleichzeitig einbestellten Patienten
- M5 = Erhöhung der Zahl der gleichzeitig einbestellten Patienten
- M6 = LOT-Regel
- M7 = SOT-Regel
- M8 = Kombination der günstigsten Strategien
- M9 = Sortieren 2 am Vormittag
- M10 = Kombination der günstigsten Strategien und Sortieren 2 am Vormittag
- M11 = M10 und Erhöhung der Zahl der Anforderungen

Tab. 3.2.6 - 1: Strategiealternativen



Ohne Schwierigkeit lassen sich die Einbestellstrategien, zumindest tendenziell, ändern. Problematischer ist der Patientenankunftsprozeß. Den deutlichsten Vorteil würde jedoch eine zusätzliche Halbtagskraft bzw. eine Aufstockung einer Halbtags- zur Ganztagsstelle bringen. Während für die oben angeführten Ablaufalternativen keine zusätzlichen finanziellen Mittel aufzuwenden wären, würden in diesem Fall Personalkosten entstehen. Diese Kosten wären allerdings in Relation zur erhöhten Kapazität der Röntgenabteilung zu setzen. Überdies würde die durchschnittliche individuelle Arbeitsbelastung sinken, was sicher einen positiven Effekt auf die medizinische Güte der Tätigkeiten mit sich brächte.

4. SIMULTANE ABLAUFPLANUNG FÜR MEHRERE LEISTUNGSSTELLEN

4.1 Problemstellung

Im Verlauf der bisherigen Ausführungen wurden die Leistungsstellen stets isoliert betrachtet. Zwar wurden die Einwirkungen anderer Leistungsstellen als Eingabedaten einbezogen, die Auswirkungen der Abläufe in der besagten Leistungsstelle auf die Umgebung wurden jedoch nicht weiter verfolgt.

In diesem Abschnitt sollen nun die gegenseitigen Abhängigkeiten der Leistungsstellen bezüglich einer simultanen Ablaufplanung berücksichtigt werden.¹⁾ Der interne Arbeitsablauf der Leistungsstellen, der in Abschnitt 3 behandelt wurde, soll dabei in seinen Auswirkungen als fest vorgegeben betrachtet werden.

Es war nicht Aufgabe der vorliegenden Arbeit, ein lauffähiges Reihenfolge- und Terminplanungssystem für ein bestimmtes Krankenhaus zu entwerfen. Es sollen vielmehr die Ergebnisse empirischer und methodischer Untersuchungen in ein Modell integriert werden, das die Struktur einer effizienten, simultanen Planung für mehrere Leistungsstellen hinreichend genau abbildet und anhand von Beispielen verdeutlicht. Es werden speziell einige Leistungsstellen des medizinischen Bereiches behandelt. Dazu gehören das Kreislauflabor, die Röntgenabteilung, usw.²⁾ Der Bedarf an Leistungen, der letztlich durch Entscheidungen der Stationsärzte über diagnostische, therapeutische und pflegerische Maßnahmen ausgelöst wird, besteht in einer Vielzahl von Anforderungen die pro Tag in die Leistungsstellen einlaufen. Formal ausgedrückt bedeutet dies, daß jedem Patienten i eine spezifische Menge L_i von Leistungen zugeordnet wird, die

1) Vgl. Eichhorn (1974), S. 309

2) Welche Leistungsstellen für die simultane Ablaufplanung zusammengefaßt werden, wird weiter unten festgelegt. Prinzipiell können selbstverständlich beliebige Leistungsstellen betrachtet werden.

das Krankenhaus erbringen kann. I ist die Menge der Patienten im Krankenhaus. Die Menge L_i kann auch leer sein. J_i ist die Zahl der Leistungen pro Patient i und Tag.

Da die Leistungsstellen eine beschränkte, materielle und zeitliche Kapazität haben, stellt sich als spezielles Problem der Ablaufplanung, wie die stationären und ambulanten Patienten, für die L_i Anforderungen angeordnet sind, bezüglich ihrer Reihenfolge untereinander und ihrer zeitlichen Aufeinanderfolge in den Leistungsstellen, am günstigsten in den Tagesablauf des Krankenhauses eingeplant werden können.

4.1.1 Zentrale Simultanplanung

Zur Zeit wird das oben beschriebene Problem in den Krankenhäusern dezentral gelöst. Das bedeutet, daß entweder die einzelnen Leistungsstellen dafür sorgen müssen, daß die angekündigten Patienten in der Leistungsstelle erscheinen, oder daß die Stationen ihre Patienten nach Belieben zu den Leistungsstellen schicken.

Die zweite Lösung führt zu größeren Leerzeiten in den Leistungsstellen, erstere zu langen Wartezeiten der Patienten und in der Folge zu einer Verlängerung der Durchlaufzeiten, soweit die Patienten sich in mehreren Leistungsstellen einzufinden haben.

Die Konsequenzen solcher Effekte sind einerseits verminderte Kapazitätsauslastung der Leistungsstellen und andererseits eine verlängerte Verweildauer pro Patient.

Eichhorn¹⁾ führt aus, daß sich an Beispielen nachweisen läßt, daß eine möglichst hohe Kapazitätsauslastung der Leistungsstellen einerseits und eine organisatorisch optimale Verweildauer der Patienten zu Kostensenkungen führen. Insofern sind diese beiden Variablen als Ersatzkriterien für eine operationale Zielfunktion mit dem Kriterium Kosten geeignet. Derartige Zeitkriterien werden vielfach in der Ablaufplanung

1) Eichhorn (1974), S. 310 f.

verwendet.¹⁾ Auf die Problematik der hier verwendeten Zielfunktion soll weiter unten noch eingegangen werden.

Diesen oben angeführten Schwierigkeiten könnte durch eine zentrale Planung des Patientenflusses durch die Leistungsstellen begegnet werden. Während die einzelnen Leistungsstellen sehr wenig Informationen über das Geschehen außerhalb ihres Bereiches haben, müßte eine zentrale Steuerung diese Informationen zu einer für das Gesamtkrankenhaus günstigen Reihenfolge und Terminplanung benutzen.²⁾ Dies fällt umso leichter, als mit Ausnahme von Notfällen und Eilanforderungen der gesamte Anforderungsbedarf am Abend vor dem Ausführungstag bekannt ist.

Voraussetzung ist, daß sämtliche Anforderungen zentral gesammelt werden. Eine derartig rechner-gestützte Dokumentation der Anforderungen für einen ganzen Tag wird zur Zeit im Rahmen des Demonstrationsprojektes Datenverarbeitung im Allgemeinen Krankenhaus (DEPAK) am Kreis- und Stadtkrankenhaus Kulmbach implementiert.³⁾

Es stellt sich also zusammengefaßt das Problem, Reihenfolge und Terminierung von Patienten, die an einem Tag zur Untersuchung in den Leistungsstellen des Krankenhauses anstehen, so zu bestimmen, daß eine festzulegende Zielfunktion optimiert wird.

Im folgenden soll auf die Datenverarbeitungsproblematik der Sammlung und Weiterleitung der für das Problem notwendigen Daten nicht eingegangen werden. Es wird hier vorausgesetzt, daß eine wie auch immer konzipierte Hardwarestruktur (etwa von der Art, der im Krankenhaus Kulmbach installierten) vorliegt, bzw. über Datenfernverarbeitung zugänglich ist, die es

1) Vgl. etwa Mensch (1968), S. 42 ff; Maxwell (1969), S. 54 ff.

2) Eine derartige zentrale Planung ist in der Deutschen Klinik für Diagnostik verwirklicht. Allerdings erfolgt die Reihenfolge- und Terminplanung durch angelernte Hilfskräfte "per Hand". Eine eigentliche Zielfunktion ist nicht zu erkennen, obwohl eine "zeitlich optimale Untersuchungsfolge" angestrebt wird (vgl. Hertle, Knick (1975), S. 37).

3) Wilde, Rudolph (1974).

gestattet, die für den untenstehenden Algorithmus notwendigen Dateien zu handhaben.

4.1.2 Prämissen der Modellbildung

Dem Reihenfolge- und Terminierungsproblem liegen eine Reihe von Prämissen¹⁾ zugrunde, die für den in den folgenden Abschnitten beschriebenen Algorithmus notwendig sind:

1. Sämtliche Anforderungen und ihre Zuordnung zu den Patienten stehen zu Beginn der Planungsperiode (= 1 Tag) zur Verfügung.
2. Transport- und Rüstzeiten sind in den Tätigkeitsdauern enthalten. Ebenso sind diejenigen ablaufbedingten Wartezeiten der Patienten in den Tätigkeitsdauern mit eingeschlossen, die sich aus nachfolgenden Tätigkeiten ergeben, für die der Patient noch benötigt wird.
3. Die Tätigkeitsdauern haben bekannte Verteilungen. Sie sind reihenfolge-unabhängig.²⁾
4. Einmal begonnene Tätigkeiten werden ohne Unterbrechung durchgeführt.
5. Zu jedem Zeitpunkt kann nur genau eine Anforderung in einer Bedienungsstation³⁾ bearbeitet werden.
6. Jede Tätigkeit wird so früh wie möglich ausgeführt.
7. Die notwendigen Geräte zur Abarbeitung der Anforderungen sind vorhanden. Ihre Zahl ist begrenzt.

-
- 1) Es handelt sich hierbei um einige der üblichen Voraussetzungen der in der Literatur beschriebenen Reihenfolgeprobleme (vgl. etwa Liesegang, Schirmer (1975), S. 199). Das vorliegende Problem besitzt jedoch eine allgemeine Struktur und unterliegt daher weniger einschränkenden Voraussetzungen. Insbesondere ist das sogenannte "passing" erlaubt, d.h. die Anforderungen können in unterschiedlicher Reihenfolge in den verschiedenen Leistungsstellen bearbeitet werden.
 - 2) Eine Intensitätsanpassung an den Anforderungsanfall einer Leistungsstelle, der sich in einer Verschiebung der Verteilungen nach links bemerkbar machen würde, ist durch diese Prämisse nicht ausgeschlossen. Jedoch gilt auch hier wieder, daß eine exakte Messung dieses Effektes einen erheblichen Datenerhebungsaufwand bedeutet. Eine Intensitätsanpassung ist in den Verteilungen daher eingeschlossen.
 - 3) Zum Begriff der Bedienungsstation siehe unten.

Die Prämissen ergeben sich teilweise aus den medizinischen und technischen Gegebenheiten der Leistungsstellen, teilweise aus Gründen der Problemvereinfachung.

Die erste Prämisse ist insofern selbstverständlich, als sämtliche Anforderungen auf Grund der täglichen Visite der Ärzte auf den Stationen entstehen und (von Ausnahmen abgesehen), die Leistungserstellung für den nächsten Tag vorgesehen ist. Es ist jedoch auch möglich, daß die relevanten medizinischen Informationen (insbesondere im diagnostischen Bereich), die der Arzt zu erhalten wünscht, erst nach 2 Tagen oder später zur Verfügung stehen.¹⁾ Für die hier betrachtete Simultanplanung hat dieser Umstand keine Bedeutung, da es ausschließlich um Leistungselemente der angeforderten Leistung geht, für die eine Beteiligung des Patienten in irgendeiner Form notwendig ist. Beispielsweise handelt es sich im Falle der Leistung Thoraxaufnahme, die in Abb. 2.2 - 1 mit den einzelnen Leistungselementen dargestellt ist, lediglich um die Leistungselemente 3 und 4.

Ferner muß der Patient noch während der Erstellung der Leistungselemente 5 bis 8 in der Röntgenstation verbleiben, sofern es sich, wie bei der Thoraxaufnahme, um eine im Falle eines Fehlers wiederholbare Leistung handelt. Unter Umständen steht wegen der begrenzten Entwicklerkapazität die entwickelte Aufnahme nicht zur Verfügung, so daß der Patient zusätzlich warten muß.²⁾ Dies gilt jedoch nicht für alle Leistungen. Ein Elektrokardiogramm ist für den Patienten mit dem Entfernen der Kontakte vom Körper beendet. Er kann die Leistungsstelle Kreislaulabor sofort verlassen.

Diese ablaufbedingten Wartezeiten nach den Leistungselementen 3 und 4 (bei Thoraxaufnahmen) sowie Gehzeiten zwischen einzelnen Leistungsstellen und Rüstzeiten (Reinigung usw.), werden nach Prämisse 2 als Teil der Tätigkeitsdauer betrachtet.

Nicht ausgeschlossen sind selbstverständlich Wartezeiten

1) Vgl. Abschnitt 3.2.

2) Vgl. Abschnitt 3.2.

der Patienten und Leerzeiten der Geräte, bevor die Leistungselemente 3 und 4 begonnen werden.

Diese Zusammenfassung ist insofern notwendig, als eine empirische Ermittlung der Rüst- und Gehzeiten infolge der großen Zahl der unterschiedlichen Leistungsreihenfolgen einen nicht zu vertretenden Datenerhebungsaufwand erfordern würde. Gibt man sich aber mit Schätzungen oder mit einer einzigen oder wenigen Rüstzeit- bzw. Gehzeitverteilungen zufrieden, be- geht man dann keinen großen Fehler mehr, diese Zeiten zu den Zeiten der Tätigkeit zu addieren. Es ist klar, daß darüber hinaus dieses Modell, das dann nur jeweils eine Tätigkeit pro Leistung berücksichtigt, erheblich einfacher strukturiert sein kann.

Die dritte Voraussetzung besagt, daß alle Tätigkeitsdauern Zufallsvariable sind.¹⁾ Diese Zufallsvariablen seien aber voneinander stochastisch unabhängig.

Diese Annahme ist in der Regel zutreffend, da die Reihenfolge der Leistungen für jeden Patienten medizinisch sinnvoll sein muß, d.h. keinerlei Einwirkungen von Leistungen auf später zu erbringende vorhanden sein dürfen.²⁾

Auch die vierte Prämisse bedeutet keine wesentliche Vergrößerung der Realität, da mit Ausnahme von Notfällen keine denkbaren Fälle auftreten, bei denen Leistungen abgebrochen werden müßten.

Für Notfälle sind teils eigene Einrichtungen vorhanden, teils bewirken sie zusätzliche Wartezeiten der übrigen Patienten.³⁾

Für die nächste Prämisse muß die Definition der Bedienstung station angegeben werden. Es sind darunter Geräte oder Orte im Krankenhaus mit dem entsprechenden Personal zu verstehen, die für die Erstellung eines Leistungselementes benötigt werden.

1) Vgl. Abschnitt 2.3.1.

2) Vgl. auch Abschnitt 4.4.

3) Siehe dazu Abschnitt 4.10.

Die fünfte Voraussetzung besagt damit, daß jede Bedienungsstation eine Kapazität von 1 [Patienten] hat.

Eine Bedienungsstation braucht nicht mit einem Raum identisch zu sein. Beispielsweise können in einem Raum mehrere Röntgenologen Befundungen vornehmen. Im Abschnitt 3.2 wurde beschrieben, daß im Befundungsraum 4 Bedienungsstationen zur Erstellung des Leistungselementes Befundung nötig sind. Sie setzen sich jeweils aus dem Röntgenologen, dem Diktiergerät, sowie Tisch und Schaukasten zusammen.

Eine etwas problematische Vereinfachung stellt die Voraussetzung sechs dar. Es sind naturgemäß zufallsbedingte Verzögerungen möglich, z.B. MTA wird ans Telefon gerufen usw. Man kann dann so verfahren, daß diese Verzögerungen den Rüstzeiten zugeschlagen werden, womit eine Einbeziehung in die Tätigkeitsdauern erreicht ist.

Die letzte Prämisse ist selbsterklärend.

4.1.3 Gang der Untersuchung des Reihenfolge- und Terminierungsproblems

Die nachfolgende Untersuchung des Reihenfolge- und Terminierungsproblems befaßt sich zuerst mit einer Erläuterung der existierenden Verfahren und Lösungsvorschläge, sowie der Begründung der vorgeschlagenen Methode.

Ein erster wichtiger Abschnitt betrifft die Erzeugung von Leistungsreihenfolgen für Patienten.

Daran schließt sich die Erläuterung der Abbildung des Problems durch einen disjunkten Graphen an.

Für ein einfaches Beispiel wird der heuristische Ansatz bis zur ersten zulässigen Lösung vorgeführt.

Die Konstruktion der optimalen Lösung geschieht dann mit einem modifizierten Branch-and-Bound-Verfahren von Charlton und Death.¹⁾

1) Charlton, Death (1970).

Hierbei wird als Zielfunktion zunächst der deterministisch früheste Endtermin verwendet, womit an Bekanntes aus der Netzplantechnik angeknüpft wird.

Es schließen sich Methoden zur rechentechnischen Beschleunigung des Algorithmus an.

Im weiteren Verlauf werden einige Erweiterungen bezüglich der Stochastik der Tätigkeitsdauern, der Auswirkung von Notfällen und allgemeiner Zielfunktionen vorgenommen.

Beispiele mit Datenmaterial aus dem Krankenhaus Kulmbach bilden den Abschluß.

4.2 Existierende Verfahren und Lösungsvorschläge

Die wenigen bisher existierenden rechnergestützten Verfahren der simultanen Reihenfolge- und Terminplanung für medizinische Leistungsstellen arbeiten sämtliche nicht mit festen Zielfunktionen, sondern überlassen den Planungsprozeß dem Personal. Der Rechner hat lediglich die Aufgabe, diese Informationen zu sammeln, zu ordnen und auf Plausibilität zu prüfen und Arbeitslisten sowie Laufzettel für die Patienten auszugeben.¹⁾ Dies dient unstreitig der Vermeidung von Irrtümern und der Orientierung der Patienten. Beispielsweise werden in der Deutschen Klinik für Diagnostik zentral den Untersuchungskapazitäten der Ärzte Patienten zugeordnet. Einen Teil des hiermit entstehenden Reihenfolge- und Terminplanes zeigt Abb. 4.2 - 1. Die Kriterien, nach denen das Personal die Einplanungen vornimmt, sind in keinem der Systeme auf ihre Auswirkungen hin untersucht, zum Teil dürften sie nicht einmal erfaßt sein.

Einen Schritt weiter geht der Lösungsvorschlag von Lutz.²⁾ Die Zeitachse der Terminpläne der Patienten und Bedienstungen, sowie die Tätigkeitsdauer der Leistung selbst werden bei diesem Verfahren in äquidistante Zeitintervalle (5 Minuten) eingeteilt.

1) Beggs u.a. (1971), Cederlund (1970), Hertle, Knick (1975).

2) Lutz (1976).

8 : 0 0		9 : 0 0		10 : 0 0	
MERTLE PROF.	022				12:30 047.550-8 Y [REDACTED] WEHRHEIM III
KAISER DOZ.	006	046.794-0 U [REDACTED] TAUNUSSTEIN 2			08:30 047.680-6 U BECK AUGSBURG HELGA
		09:15 046.791-9 S [REDACTED] MAINZ-KOSTHEIM	WIED. 098.931-4 U [REDACTED] MAINZ-MOMBACH	WIED. 087.291-0 U [REDACTED] WIESBADEN	
KNICK PROF.	021				WIED. 046.070-7 S [REDACTED] FRANKFURT 198
KUHL PROF.	025				WIED. 095.667-6 S VIEBAHN USINGEN KARIN
LOCH DOZ.	005	047.667-5 S [REDACTED] WIESBADEN			
MATTHIENSEN 031		047.523-4 Y [REDACTED] WIESBADEN			08:30 047.517-7 Y [REDACTED] FRONHAUSEN

Eine Leistung, die für einen Patienten in einer bestimmten Bedienstungsstation erbracht werden soll, wird sowohl in einem Terminplan des Patienten als auch in einem Terminplan der Bedienstungsstation eingeordnet.

Hierbei werden durch ein Abfrageverfahren die frühestmöglichen Intervalle von Patient und Bedienstungsstation gesucht, die größer oder gleich der Zahl der Zeitintervalle der Tätigkeitsdauer¹⁾ sind, die eingeplant werden soll.

Als Beispiel sei folgende Situation gegeben (Abb. 4.2 - 2)²⁾:



Abb. 4.2 - 2: Ausgangssituation für die Einplanung von Leistungen nach Lutz

Die Einplanung der Leistung ergibt die nachstehenden Terminpläne (Abb. 4.2 - 3):

- 1) Diese Tätigkeitsdauern werden hierbei als deterministische Äquivalente einer Zufallsvariablen angesetzt. Siehe dazu 4.9.2.
- 2) Die Kästchen stellen Zeitintervalle dar. Der Beginnzeitpunkt des Intervalles ist in jedem Kästchen eingetragen. Diese und die folgende Zeichnung ist Lutz (1976) entnommen.

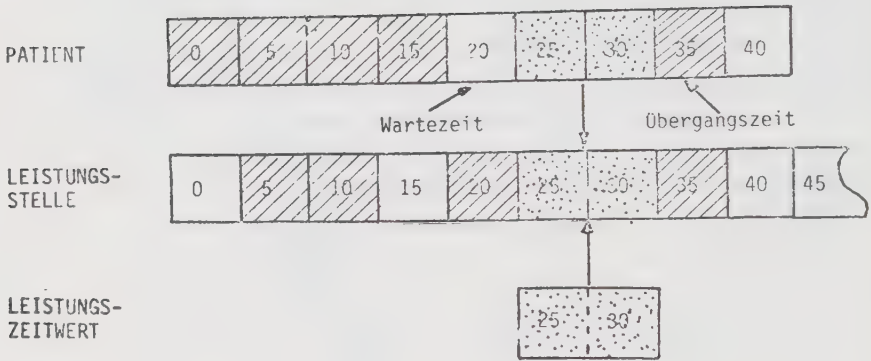


Abb. 4.2 - 3: Einplanung einer Leistung nach Lutz

Auf diese Weise werden sämtliche Leistungen eingeordnet. Dabei werden Patienten mit mehreren Leistungen vor Patienten mit weniger Leistungen berücksichtigt. Die Reihenfolge der Leistungen pro Patient liegt fest.

Ein anderer Lösungsvorschlag¹⁾ plant die Leistungen nach aufsteigender Auslastung der Leistungsstellen ein und gelangt mit dieser Heuristik zumindest zu einem Suboptimum bezüglich der Leerzeiten. Die Einplanung geschieht wieder durch einen Suchalgorithmus. Beide Verfahren berücksichtigen medizinische Prioritäten.

Der in den folgenden Abschnitten beschriebene Lösungsvorschlag erweitert und vertieft diese ersten Annäherungen an das Problem in vieler Hinsicht.

4.3 Begründung des vorgeschlagenen Verfahrenstyps

Bevor das entwickelte Verfahren zur Konstruktion optimaler Reihenfolgen beschrieben wird, soll eine Begründung für diese spezielle Methode und ein Vergleich mit anderen möglichen

1) Brauer (1974), S. 3.

Methoden zur Lösung des in 4.1 dargelegten Problems gegeben werden.

Grundsätzlich stehen drei Lösungsmöglichkeiten zur Verfügung:

1. Analytische Methoden
2. Heuristische Methoden und
3. Simulation.

Analytische Methoden zur Lösung von speziellen Reihenfolgeproblemen für die Fertigungsplanung in Industriebetrieben sind in großer Zahl in der Literatur zu finden. Diese Methoden bieten die Gewißheit im Rahmen einer gewissen Rechengenauigkeit eine optimale Lösung des Problems zu liefern.

Die Lösung mit ganzzahliger linearer Programmierung¹⁾ scheitert für realistische Größenordnungen des vorliegenden Problems an der unvermeidbar großen Rechenzeit.

Ein Reihenfolgeproblem für nur zwei Maschinen und zwei Anforderungen, das mit dem Gomory-Verfahren gelöst wurde, benötigte auf einer TR 440 Anlage ca. 26 Sekunden. Schon bei diesem trivialen Problem traten sieben Strukturvariable und zehn Nebenbedingungen auf. Selbst sehr schnelle Softwarepakete zur Lösung ganzzahliger Programme benötigen für größere Probleme einen hohen Rechenaufwand.²⁾

Für ein 50 x 10 Reihenfolgeproblem (50 Aufträge, 10 Geräte, auf denen die Aufträge ausgeführt werden) beträgt die Zahl der Variablen für das Modell von Manne schon weit über 500, die Zahl der Restriktionen ist weit über 1000.

Die übrigen analytischen Verfahren bedienen sich fast alle graphentheoretischer bzw. kombinatorischer Methoden. Sie sind für größere Probleme nur bis zu einer gewissen Grenze geeignet.³⁾

1) Manne (1963), S. 187 ff.

2) Vgl. Geoffrion, Marsten (1972).

3) Hahn (Hahn (1972), S. 113) berichtet von der Anwendung kombinatorischer Methoden auf Probleme der Fließfertigung, daß analytische Verfahren sich noch bei 40 - 60 verschiedenen Fertigungsvarianten anderen Verfahren überlegen erwiesen, da sie die exakte Lösung ermitteln. Erst bei Problemen, die über diesen Umfang an Varianten hinausgingen, waren heuristische Verfahren vorzuziehen, da deren Rechenaufwand dann geringer war.

Ein weiterer Einwand gegen diese Modelle ist, daß sie meist mit deterministischen Variablen arbeiten.¹⁾ Auf eine stochastische Betrachtungsweise kann aber nicht verzichtet werden, da sonst beträchtliche Fehler entstehen.²⁾

Vielfach sind auch heuristische Verfahren zur Lösung von Reihenfolgeproblemen vorgeschlagen worden. Sie haben die Eigenschaft, mit geringerem rechentechnischen Aufwand eine zwar im Sinne der Problemstellung zulässige, jedoch nicht notwendig optimale Lösung zu gewährleisten. Unter Umständen ist die Abweichung von der optimalen Lösung beträchtlich.³⁾

Auf Erfahrungen bezüglich des zeitlichen Aufwandes bei der Berechnung größerer Probleme des vorliegenden Typs auf einer EDV-Anlage ist in der Literatur nirgends hingewiesen. Zudem sind die dort zitierten Verfahren sämtlich für den deterministischen Fall gedacht.

Es sind zwei Typen von heuristischen Verfahren zu unterscheiden. Einmal solche, die unmittelbar unter Anlehnung an das spezielle Problem eine Heuristik zur Lösung verwenden. Beispielsweise führt Palmer⁴⁾ einen "slope index" ein, der ein Maß für die Reihenfolge der Aufträge darstellt. Dieser Index ergibt sich aus einer Gewichtung und Aufsummierung der Tätigkeitsdauern auf den einzelnen Maschinen. Er ist so konstruiert, daß diejenigen Aufträge bevorzugt werden, die die stärkste Tendenz haben, daß auf kurze Tätigkeiten lange dauernde Tätigkeiten folgen.

Der zweite Typ von Verfahren, die man auf das vorliegende Problem anwenden könnte, wären Methoden der Optimierung von Netzplänen. Hierbei geht es in der Literatur um Kapazitätsnivellierung bzw. personal smoothing. Es wird bei der Einarbeitung der Tätigkeiten die Reihenfolge gemäß einer Prioritätsregel bestimmt. Die Prioritätsregel kann sich aus einzelnen gewichteten Kriterien bzw. aus einer Hierarchie von Kriterien zusammensetzen.⁵⁾

1) Ausnahme Rothkopf (1966).

2) Näheres siehe unten.

3) Vgl. dazu Jacob (1969), S. 48, Davis, Patterson (1975).

4) Palmer (1975), S. 102.

5) Vgl. etwa Riester, Schwinn (1970), S. 68, Jacob (1969), S. 46.

Ein Nachteil dieser Vorgehensweise ist, daß der Benutzer eigentlich die Prioritätsregel vor der Anwendung des Verfahrens selbst festlegen müßte, d.h. die Auswirkungen der Prioritätsregel kennen muß, da er ja ein bestimmtes Ziel verfolgt. Das ist jedoch nicht möglich, da er für das spezielle Problem erst statistische Untersuchungen bezüglich der Güte bestimmter Prioritätsregeln anstellen müßte.

Gewöhnlich wird auch bei jeder zu behandelnden Problemstellung unterstellt, sie sei statisch. Beim vorliegenden Problemtyp ist dies nicht der Fall. Organisatorische und materielle Änderungen sind recht häufig. Insbesondere würde eine Änderung der Zielfunktion selbstverständlich eine völlig andere Problemlösung bedingen. Zum Teil sind aber schon in den Verfahren Zielkriterien implizit vorgegeben, z.B. Kapazitätsnivellierung, was sie für das vorliegende Problem unbrauchbar macht.

Generell läßt sich sagen, daß fast alle analytischen wie heuristischen Methoden den Nachteil haben, daß sie nur spezielle Probleme vor allem bezüglich der Zielfunktion behandeln, z.B. soll ein vorgegebener Termin eingehalten werden.

Vielfältig wurden auch Simulationsverfahren zur Lösung von Reihenfolgeproblemen eingesetzt. Sie arbeiten ebenfalls mit erst zu konstruierenden Prioritätsregeln, die mitunter recht kompliziert aufgebaut sind. Auch hier gilt als Haupteinwand gegen die bekannten Verfahren, daß sie ein stationäres System voraussetzen.¹⁾

Darüber hinaus müssen selbst im stationären Fall bei der Ermittlung der Prioritätsregeln Einbußen bezüglich Genauigkeit hingenommen werden, da auch die statistische Auswertung von Simulationsläufen selbstverständlich nur mit Fehlern behaftete Resultate liefert. Allerdings ist es mit Hilfe der Simulation möglich, das zu untersuchende System sehr genau abzubilden, dies kann unter Umständen die Nachteile aufwiegen. Überdies ist die Simulation unter Umständen wegen der

1) Dörken (1973); Niedereichholz (1970).

komplexen Struktur eines abzubildenden Systems die einzige Möglichkeit.¹⁾

Die Ergebnisse der Simulationsläufe würden dann in der Festlegung der anzuwendenden Prioritätsregel bestehen.

Das in Abschnitt 4.1 geschilderte Problem ist, wie noch näher erläutert wird, einerseits von einer beträchtlichen Größenordnung, andererseits ist die Komplexität begrenzt, da bei der simultanen Ablaufplanung nur die gegenseitigen Abhängigkeiten der Leistungsstellen, nicht ihr interner Arbeitsablauf behandelt werden muß. Daher erschien es zweckmäßig, ein analytisches und ein heuristisches Verfahren so zu kombinieren, daß bei kleinerem Problemumfang eine exakte Lösung möglich ist, größere Probleme mit einem Näherungsverfahren bestimmt werden können.

Wie noch gezeigt werden soll, ist das analytische Verfahren nur für Zielfunktionen anwendbar, die Verweilzeiten bzw. Durchlaufzeiten minimieren. Für Zielfunktionen, die auch Leerzeiten beinhalten, wird das heuristische Verfahren angewendet.

4.4 Konstruktion von Leistungsreihenfolgen für Patienten

4.4.1 Medizinisch zulässige Leistungsreihenfolgen

Die Ermittlung von optimalen Reihenfolgen muß aufgrund der medizinischen Gegebenheiten stufenweise erfolgen. Da, wie schon erwähnt, die Anforderungen von den Stationsärzten ausgehen, bestimmen diese qualitativ und quantitativ das Spektrum der Anforderungen jedes Patienten an einem Tag. Diese Entscheidung wird nach rein medizinischen Gesichtspunkten gefällt. In der Regel schreibt der Arzt nicht vor, in welcher Reihenfolge die Anforderungen eines Patienten durchgeführt werden sollen. Das ist auch deshalb nicht möglich, weil er keinen Kontakt zu den Leistungsstellen hat und in deren Arbeitsgestaltung nicht eingreifen kann und will. Die

1) Aus diesem Grund wurde die Simulation auch für das Modell der Röntgenabteilung gewählt.

Folge derartiger nicht festgelegter Anforderungsreihenfolgen ist, daß bestimmte Anforderungen für einen Patienten nicht mehr erbracht werden können, da sonst eine medizinisch nicht zulässige Untersuchungsfolge eintreten würde. So ist es nicht möglich, Blutuntersuchungen im Labor durchzuführen, wenn der Patient vorher in der Röntgenabteilung eine Kontrastinfusion erhielt. Wurde dennoch die Röntgenuntersuchung durchgeführt, so muß die Laboranforderung auf den nächsten Tag verschoben werden.

Eine zentrale Festlegung der medizinisch zulässigen Reihenfolgen bietet einen Ausweg aus dieser Problematik.

Dazu muß eine Matrix $\underline{R}$ erstellt werden, die für das gesamte Leistungsspektrum festlegt, ob die Aufeinanderfolge zweier Leistungen L_j und L_k medizinisch zulässig ist.

Für ein Element r_{jk} dieser Matrix gilt

$$(4.4.1 - 1) \quad r_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{medizinisch zulässige Aufeinander-} \\ & \text{folge der Leistung } L_k \text{ auf } L_j \\ 0 & \text{medizinisch nicht zulässige Auf-} \\ & \text{einanderfolge der Leistung } L_k \\ & \text{auf } L_j \end{cases}$$

Die Bestimmung der Elemente einer solchen Matrix bleibt den Ärzten, Schwestern und MTA's vorbehalten.

Im Falle eines Leistungsspektrums von fünf Untersuchungen ergibt sich beispielsweise die Matrix:

$L_j \backslash L_k$	1	2	3	4	5
1	1	0	0	1	0
2	0	1	1	0	0
3	0	1	0	0	1
4	0	0	1	0	1
5	0	0	1	1	0

= $\underline{R}$

Tab. 4.4.1 - 1: Beispiel für die Matrix $\underline{R}$

Die Anforderungen L_j sind mit natürlichen Zahlen bezeichnet. Ordnet der Stationsarzt für einen Patienten $i \in I$ die Anforderungen $L_i = \{3, 4, 5\}$ an, so ergibt sich die Menge von medizinisch zulässigen Leistungsreihenfolgen¹⁾ $\vec{L}_i = \{\vec{L}_{i_1}, \vec{L}_{i_2}, \dots, \vec{L}_{i_v}, \dots\}$, für deren Elemente, d.h. Reihenfolgen gelten muß:

$$(4.4.1 - 2) \quad \vec{L}_{i_v} = \{ \langle L_j, L_k \rangle : L_j \in L_i, L_k \in L_i, r_{jk} = 1 \} \quad \forall i \in I$$

$\vec{L}_{i_v}$				
3	-	5	-	4
4	-	3	-	5
4	-	5	-	3
5	-	4	-	3

Tab. 4.4.1 - 2: Medizinisch zulässige Leistungsreihenfolgen

Sämtliche zulässigen Reihenfolgen $\vec{L}_{i_v}$ der Patienten müssen durch einen Suchalgorithmus auf dem Rechner bestimmt werden.

Geht man davon aus, daß pro Tag und Patient höchstens vier Leistungen bezüglich der Leistungsstellen, für die eine Simultanplanung durchgeführt werden soll, verordnet werden, ergeben sich maximal 24 mögliche Leistungsfolgepermutationen.

Selbst bei 200 Patienten sind dies maximal erst 4800 Leistungsfolgen. Da jedoch die überwiegende Zahl der Patienten weniger als vier (eine oder zwei) Leistungen erhält und außerdem viele Reihenfolgen nicht zulässig sind, wird man auch bei 200 Patienten von einer zu speichernden Zahl von Leistungsfolgen in der Größenordnung von 1500 ausgehen können.²⁾

- 1) Jede Leistungsreihenfolge bezieht sich auf das individuelle, tägliche Programm für einen Patienten. Sie ist nicht mit der Patientenreihenfolge, deren Festlegung den Kern des Problems ausmacht, zu verwechseln!
- 2) Dieser Umfang bringt bezüglich Rechenzeit und Speicherbedarf keine Probleme mit sich.

4.4.2 Leistungsreihenfolgeprioritäten

Es mag für den Stationsarzt aus medizinischen Gründen wünschenswert sein, über die Festlegung der medizinisch zulässigen Leistungsfolge eines Patienten hinaus, aber ohne Rücksicht auf die Belastung durch die verordneten Maßnahmen, eine ihm sinnvolle, individuelle Reihenfolge der Leistungen vorzuschreiben.

Dies geschieht durch das Zuteilen von Prioritätskennziffern $PK = \{0, 1, 2, 3\}$. Will der Arzt eine Leistungsreihe vollständig bestimmen, so muß er allen Leistungen eine ganze Zahl zwischen 1 und 4 zuordnen.

Durch einen Sortiervorgang der Tätigkeiten mit höheren Prioritätskennziffern vor solchen mit niedrigeren anordnet, ergibt sich die Menge der Leistungsreihenfolgen $L_i(PK) = \overline{L}_i(PK)$.

4.4.3 Belastung des Patienten

Ein weiteres Kriterium für den Aufbau von Anforderungsreihenfolgen ist die physische und psychische Belastung, die der Patient durch die an ihm vorgenommenen therapeutischen, diagnostischen und pflegerischen Tätigkeiten erfährt. Bekanntlich gibt es Fälle, in denen die Belastung durch die Krankheit selbst geringer ist als durch die notwendigen medizinischen Tätigkeiten. Eine Verringerung der Belastung hat außerdem einen schnelleren Genesungsprozeß zur Folge. Daher ist gefordert worden, die Belastung der Patienten in die Reihenfolgebestimmung mit einzuführen.¹⁾

Voraussetzung dafür ist, daß eine Skala bestimmt werden kann, die die unterschiedlichen Belastungen bei der Aufeinanderfolge bestimmter Tätigkeiten festlegt. Auch diese Skala sowie die Zurodnung der einzelnen Tätigkeiten muß wiederum vom medizinischen Personal erstellt werden.

Damit läßt sich eine Matrix der Belastung BL aufstellen.

Eine zum Beispiel von Tab. 4.4.1 - 1 zugehörige Belastungsmatrix stellt Tab. 4.4.3 - 1 dar.

1) Wilde, Rudolph (1974), S. 35.

$L_j \backslash L_k$	1	2	3	4	5
1	2	0	0	4	0
2	0	3	1	0	0
3	0	6	0	0	5
4	0	0	2	0	3
5	0	0	1	3	0

= BL

Tab. 4.4. 3 - 1: Beispiel für Belastungsmatrix BL

Ein Element $b_{j,k}$ kennzeichnet die Belastung eines Patienten bei der Folge der Leistung L_k auf L_j .

Bestimmt man nun beispielsweise für die medizinisch zulässigen Anforderungsreihenfolgen L_i von Tab. 4.4.1-2 die Summe der einzelnen Belastungen, so ergeben sich folgende Werte:

L_i (PK)	Belastung
3 - 5 - 4	8
4 - 3 - 5	7
4 - 5 - 3	4 ***
5 - 4 - 3	5

Tab. 4.4.3 - 2: Belastung durch die Leistungsreihenfolge L_i (PK)

Die oben beschriebene Vorgehensweise ist problematisch. Der Maßstab, mit dem die Belastung der Patienten gemessen wird, muß notwendigerweise eine Ordinalskala sein, da nur eine solche vom Personal angegeben werden kann. Die Bestimmung einer Kardinalskala dürfte gegenwärtig nicht möglich sein.

Da also über die Differenzen der jeweiligen Maßzahlen nichts ausgesagt werden kann, ist es im Grunde auch nicht möglich, auf einer derartigen Struktur algebraische Operationen wie hier die Addition zu definieren. Aus Mangel an empirischen Befunden, ist jedoch kein anderer Weg möglich, daher wurde

auf diese Vorgehensweise zurückgegriffen. Die Mängel dieses Verfahrens können dadurch abgemildert werden, daß eine möglichst "dichte" Skala bestimmt wird. Dies stößt jedoch rasch an die Grenzen der Schätzgenauigkeit des Personals.

Aus diesen Reihenfolgen wird nun diejenige Reihenfolge $\vec{L}_i$ (PK) mit minimaler Belastung für den Patienten ausgewählt.

(In Tab. 4.4.3-2 mit *** gekennzeichnet). Es können auch mehrere, minimale Reihenfolgen auftreten. Die Menge dieser Leistungsreihenfolgen sei mit $\vec{L}_i^*$ bezeichnet.

Faßt man die bisherige Vorgehensweise zusammen, so wird durch sie das Problem gelöst, aus dem Spektrum der möglichen Leistungen des Krankenhauses für jeden der I Patienten im Krankenhaus medizinisch zulässige Leistungsreihenfolgen $\vec{L}_i^*$ mit minimaler Belastung auszuwählen. Dabei gilt:

$$(4.4.3 - 1) \quad \vec{L}_i^* \in \vec{L}_i \text{ (PK) und } L_i \subset L$$

Formal angeschrieben, lautet das Problem:

$$(4.4.3 - 2) \quad \vec{L}_i^* = \min \left\{ L_i \text{ (PK)}, \sum_{j,k \in J_i} b_{j,k} \right\} \quad \forall i \in I$$

Ist die Menge der Elemente von $\vec{L}_i^*$ größer als 1, so wird eine beliebige Reihenfolge ausgewählt.

Es wäre auch möglich, mehrere unterschiedliche $\vec{L}_i^*$ in den unten beschriebenen Algorithmus einzubringen. Dies hätte jedoch eine beträchtliche Ausweitung von Rechenzeit und Speicherbedarf zur Folge, so daß darauf verzichtet wurde. Es wird damit ein gewisser Optimalitätsverlust in Kauf genommen, da alternative Leistungsfolgen unter Umständen bessere Ergebnisse liefern könnten.

4.5 Graphentheoretische Interpretation des Problems

4.5.1 Abbildung des Reihenfolgen- und Terminierungsproblems als Graph

Das in den vorangehenden Abschnitten dargelegte Problem kann nun ohne Schwierigkeiten als Graph abgebildet werden. Graphentheoretische Ansätze zur Lösung derartiger Probleme sind in der Literatur weit verbreitet.¹⁾

Dazu sollen kurz einige graphentheoretische Begriffe dargestellt werden.²⁾

Es sei eine endliche Punktmenge X gegeben. Ferner existiere eine binäre Relation auf einer Produktmenge $X \times X$. Die Menge aller geordneten Paare (x, y) bei denen die binäre Relation besteht ist

$$(4.5.1 - 1) \quad G \subset X \times X$$

Die Menge G ist als Graph interpretierbar.

X stellt die Menge seiner Knoten dar.

Jedes Element $(x, y) \in G$ mit $x, y \in X$ wird dann als eine Kante des Graphen interpretiert.

Da nur eine spezielle Klasse von Graphen betrachtet werden soll, werden die Eigenschaften des Graphen noch weiter spezifiziert. Im Folgenden sollen nur solche Graphen zugrundegelegt werden, die durch eine partielle sowie eine totale strenge Ordnungsrelation erklärt sind. Es sind dies gerichtete Graphen.

Eine totale Ordnungsrelation herrscht, wenn gilt:

$$(4.5.1 - 2) \quad x < y \quad \forall x, y \in X$$

Eine partielle Ordnungsrelation besteht dann, wenn diese Beziehung nur für eine Untermenge X_p von X gilt:

1) Etwa Balas (1970).

2) Siehe dazu auch Kaufmann (1971), S. 22 ff.

$$(4.5.1 - 3) \quad x < y \quad \forall x, y \in X_p \subset X$$

Die strenge Ordnungsrelation hat die Eigenschaften der Transitivität und der strengen Antisymmetrie:

$$(4.5.1 - 4) \quad (x, y) \in Z \quad \text{und} \quad (y, z) \in Z \Rightarrow (x, z) \in Z$$

$$(4.5.1 - 5) \quad \forall (x, y) \in Z : (x, y) \in Z \Rightarrow (y, x) \in Z$$

Damit ist die Reflexivität und Symmetrie ausgeschlossen. Das bedeutet anschaulich, daß parallele Kanten zwischen zwei Knoten und eine Kante die von einem Knoten ausgeht und in ihn wieder mündet, nicht zugelassen sind. Als Gegenbeispiel diene Abb. 4.5.1 - 1. Hier ist Reflexivität und Symmetrie nicht ausgeschlossen.



Abb. 4.5.1 - 1: Graph mit reflexiven und symmetrischen Eigenschaften¹⁾

Die Knoten des Graphen, der das Reihenfolgen- und Terminierungsproblem abbildet sind nun als Ereignisse zu interpretieren, z.B. der Zeitpunkt zu dem ein Patient eine Bedienstungsbetritt. Die Kanten sollen Tätigkeitsdauern in den Bedienstungsstationen entsprechen.

Nun soll davon ausgegangen werden, daß die Reihenfolge, in der ein einzelner Patient die Leistungsstellen durchläuft, festliegt. Das heißt, daß jedem Patienten i ein Element von $\vec{L}_i$ gemäß Beziehung (4.4.3 - 2) zugeordnet wird. Die Vorgehensweise wurde in Abschnitt 4.4 beschrieben. Die Reihenfolge der Patienten untereinander ist dagegen noch offen. Sie stellt das eigent-

1) Die Ordnung des Graphen wird durch die Pfeile an den Kanten angegeben.

liche Problem dar. Nach den obigen speziellen graphentheoretischen Definitionen handelt es sich dann um einen Graph folgenden Aussehens:

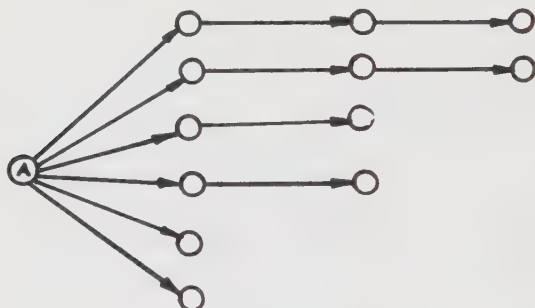


Abb. 4.5.1 - 2: Graph des Reihenfolge- und Terminierungsproblems

Dabei stellt A einen virtuellen Anfangsknoten¹⁾ dar. Die einzelnen Zweige sind die von den jeweiligen Patienten zu durchlaufenden Untersuchungsreihenfolgen.

Der Graph in Abb. 4.5.1 - 2 ist typisch für das vorliegende Reihenfolge- und Terminierungsproblem. Jeder Zweig besteht aus einer begrenzten Anzahl von Knoten. Wobei aber die überwiegende Mehrzahl der Zweige nur einen oder zwei Knoten aufweisen wird. Ein realistischer Graph wird also ein insgesamt extrem breites Aussehen haben (ca. 80 Patienten), aber andererseits sehr kurz sein, was die Zahl der Knoten vom Anfangs- bis zum Endknoten eines Zweiges betrifft.

Ein derartiger Graph wird als Baum bezeichnet.²⁾

Da, wie schon erwähnt, mehrere Patienten, selbst bei der nun festgelegten Leistungsreihenfolge, unter Umständen zur

1) Dieser Knoten wird auch als Wurzel bezeichnet (vgl. etwa Dörfler, Mühlbacher (1973), S. 50).

2) Ebenda, S. 21 ff.

gleichen Zeit in einer der Leistungsstellen untersucht werden müssen, ist dafür Sorge zu tragen, daß unter diesen, um eine Leistungsstelle sozusagen konkurrierenden Patienten, eine eindeutige Reihenfolge bestimmt wird. D.h. bislang hat man es mit einer partiellen, strengen Ordnungsrelation zu tun. Diese soll nun in eine totale, strenge Ordnungsrelation überführt werden. Dabei gilt

$$(4.5.1 - 6) \quad X = \bigcup_i L_i^* = \{ x_1, \dots, x_N \}$$

mit N = Gesamtzahl der Leistungen pro Tag

D.h. X umfaßt sämtliche Leistungen, die pro Tag erbracht werden sollen. X ist einerseits als Knotenmenge eines Graphen, andererseits als Menge der Ereignisse "Beginn der Leistung" im Sinne eines Ereignisgraphen¹⁾ zu interpretieren. Die Menge $S_m \subset X$ stellt den Beginn derjenigen Untersuchung dar, die sich in einer Bedienstationsstation zeitlich überlappen würden. Um zu erreichen, daß eine Patientenreihenfolge ohne Überlappungen entsteht, muß gelten:

$$(4.5.1 - 7) \quad \left. \begin{array}{l} t_{x_j} - t_{x_i} \geq d_{x_i x_j} \\ \text{oder} \quad t_{x_i} - t_{x_j} \geq d_{x_j x_i} \end{array} \right\} \forall x_i, x_j \in S_m, \quad \forall m \in M$$

$$t_{x_i} \geq 0$$

Dabei ist t_{x_i} der Beginnzeitpunkt einer Leistung i , M ist die Anzahl der verschiedenen vorkommenden Geräte in den Leistungsstellen und $d_{x_i x_j}$ ist die Dauer einer Leistung x_i , die zwischen ihrem Anfangszeitpunkt t_{x_i} und dem Anfangszeitpunkt t_{x_j} der darauffolgenden Leistung x_j liegt.²⁾

Der Graph, der sich damit ergibt, hat z.B. folgendes Aussehen:

-
- 1) Zum Begriff des Ereignisgraphen siehe etwa Meyer, Hansen, Rohde (1973), S. 94.
 - 2) d ist identisch mit der Zeitdauer einer Anfang-Anfang-Anordnungsbeziehung für Ereignisgraphen in der Netzplantechnik.

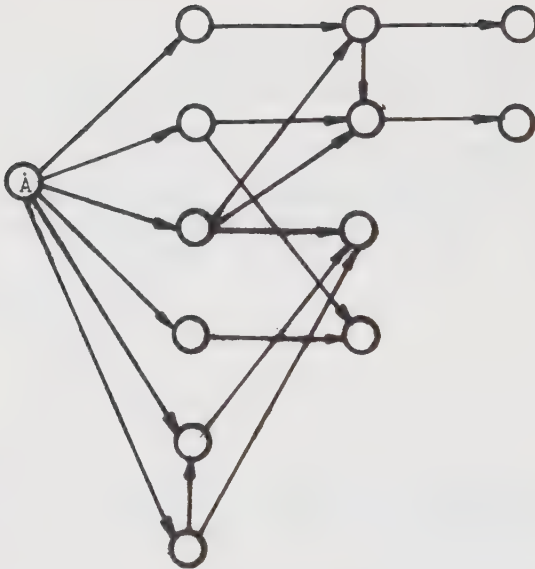


Abb. 4.5.1 - 3: Graph, der Beziehung (4.5.1 - 7) erfüllt

Er stellt dann die geforderte, totale, strenge Ordnungsrelation dar. Das in Abschnitt 4.1 definierte Problem besteht also in der Konstruktion eines speziellen Graphen, der den Beziehungen (4.5.1 - 2), (4.5.1 - 4) und (4.5.1 - 5), (4.5.1 - 6) genügen muß.

Dieser Graph liefert Aussagen über die Reihenfolge der Patienten in den Bedienstationsstationen sowie die Anfangszeiten der Leistungen.

Die Dauer $d_{x_i x_j}$ einer Leistung ist eine Zufallsvariable.

Gleiches gilt für die t_{x_i} . Dabei ist nach Prämisse zwei in Abschnitt 4.1.2 die Leistung zu einem einzelnen Leistungselement zusammengefaßt.

4.5.2 Lösungsfindung mittels disjunkter Graphen

Nun ist aber noch die Zielsetzung, nach der die Konstruktion des Graphen erfolgen soll, offen. Wie in Abschnitt

4.1 erwähnt, geht es darum, unter der Menge der Graphen, die die Beziehungen (4.5.1 - 2), (4.5.1 - 4), (4.5.1 - 5), (4.5.1 - 7) erfüllen, diejenigen herauszusuchen, die die Zielfunktion optimiert. Bezeichnet man ganz allgemein die Zielfunktion mit ZF und die Menge der Kanten, die eine Vollständige Reihenfolge der Untersuchungen festlegen mit D, so kann man jetzt das Problem¹⁾, wie folgt, anschreiben:

$$(4.5.2 - 1) \quad \left. \begin{array}{l} \text{ZF} \rightarrow \text{opt!} \\ t_{x_j} - t_{x_i} \geq d_{x_i x_j} \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} (x_i, x_j) \in Z \cup D, \quad t_{x_i} \geq 0 \\ \forall x_i, x_j \in S_m \Rightarrow \begin{cases} (x_i, x_j) \in D \\ (x_j, x_i) \in D \end{cases} \text{ oder} \end{array}$$

Letzteres muß gelten, da ja entweder Ereignis x_i auf Ereignis x_j folgt oder umgekehrt. Einen derartigen Graphen nennt man disjunkt. Z ist wie in (4.5.1 - 1) die Kantenmenge des Ausgangsgraphen.

Ein Beispiel für einen diskjunkten Graphen zeigt Abb. 4.5.2 - 1.

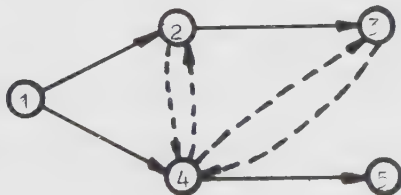


Abb. 4.5.2 - 1: Beispiel für einen disjunkten Graphen

In D sind für diesen Graphen dann entweder die Kanten (2,4) bzw. (4,2) und (3,5) bzw. (5,3) enthalten.

Die Knoten x_i werden mit natürlichen Zahlen gekennzeichnet. Die Bezeichnung der Knoten d.h. Beginnzeitpunkte von Tätigkeiten und die Kennzeichnung der Tätigkeiten selbst sind im folgenden identisch. Daher ist auch jedem $d_{x_i x_j}$ die Dauer der in x_i beginnenden Tätigkeit zugeordnet.

Als weitere Forderung ist vom Algorithmus Kreis-Freiheit zu

- 1) (4.5.2 - 1) stellt das Problem in der Form eines linearen Programmes dar. Ein derartiger Lösungsalgorithmus wird trotz der natürlichen Ganzzahligkeit des Problems nicht verwendet, da das Simplexverfahren für das Aufsuchen der optimalen Lösung zu aufwendig ist.

gewährleisten. Unter einem Kreis in einem gerichteten Graphen ist eine Reihenfolge von Kanten zu verstehen, derart, daß der erste und der letzte Knoten, die durch diese Kanten berührt werden, identisch sind.¹⁾ Weshalb diese Forderung ohne Schwierigkeiten eingehalten werden kann, wird in diesem Abschnitt weiter unten erläutert.

Die Einführung der Menge der disjunkten Kanten D gewährleistet, daß eine eindeutige Reihenfolge der Leistungen zustande kommt, d.h. keine zeitlichen Überschneidungen auftreten.²⁾

Konkurrieren nämlich die Leistungen eins und zwei um eine Leistungsstelle, d.h. müßten sie zur gleichen Zeit bzw. teilweise überlappend ausgeführt werden, wird durch Einfügen der Kante (1,2) oder der Kante (2,1) eine entsprechende Reihenfolge der Leistungen eindeutig determiniert.

Damit wird der Graph in Abb. 4.5.1 - 3 noch weiter spezialisiert. Die Menge der Kanten k_1^a , die in einen Knoten führt, genügt folgender Bedingung

$$\begin{aligned} & |k_A^a| = 0 \quad \text{Anfangsknoten} \\ (4.5.2 - 2) \quad & 1 \leq |k_1^a| \leq |s_m| \quad \text{Knoten } i \\ & |k_E^a| = 1 \quad \text{Endknoten für Patient } j \end{aligned}$$

Für die Menge der Kanten k_1^e , die aus einem Knoten herausführt, gilt

$$\begin{aligned} & |k_A^e| = I \quad \text{Anfangsknoten} \quad I \text{ Zahl der Patienten} \\ (4.5.2 - 3) \quad & 1 \leq |k_1^e| \leq |s_m| \quad \text{Knoten } i \\ & |k_E^e| = 0 \quad \text{Endknoten für Patient } j \end{aligned}$$

Das Reihenfolge- und Terminierungsproblem stellt sich jetzt als Bestimmung desjenigen diskunkten Graphen $Z \cup D$, der die Beziehung (4.5.2 - 1) erfüllt.

1) Vgl. etwa Dörfler, Mühlbacher (1972), S. 41.

2) Vgl. Abschnitt 4.1.2 Prämisse 5.

3) Hierbei ist $|k_A^a|$ die Mächtigkeit, d.h. die Zahl der Elemente der Menge der Kanten, die aus A herausführen.
Zum Begriff der Mächtigkeit siehe etwa Schmidt (1966), S. 205.

Dies ist identisch mit einer zulässigen Lösung des Problems. Unter einer zulässigen Lösung der vorliegenden Reihenfolge soll ein disjunkter Graph $Z \cup D$ verstanden werden, der die Beziehung (4.5.1 - 7) erfüllt. Dieser Graph sei mit a bezeichnet.

Unter einer optimalen Lösung soll folgendes verstanden werden:

Eine optimale Lösung ist erreicht, wenn ein disjunkter Graph $Z \cup D$ so beschaffen ist, daß die Beziehung (4.5.2 - 1) erfüllt. Dieser Graph sei mit a^* gekennzeichnet.

Die Menge sämtlicher, zulässiger Lösungen sei A

Eine nicht zulässige Lösung ist jeder Teilgraph $Z \cup \{(x_i, x_j) \in D\}$ d.h. es sind nicht sämtliche Leistungen in eine eindeutige Reihenfolge gebracht.

Es mag nicht ganz einsichtig erscheinen, weshalb die Zahl der in bzw. aus einem Knoten laufenden Kanten bis zu $|S_m|$ betragen soll. Man muß jedoch berücksichtigen, daß durch eine Festlegung der Reihenfolge zweier Tätigkeiten lediglich feststeht, welche von ihnen vor der anderen ausgeführt wird. Es steht damit noch keineswegs fest, ob sie auch unmittelbar oder durch eine dritte Tätigkeit (bzw. weitere Tätigkeiten) getrennt aufeinander folgen. Das bedeutet, daß sich im Extremfall zwischen die geordneten Tätigkeiten noch der Rest der $|S_m|$ einzuplanenden Tätigkeiten einschieben kann.

Anhand eines Beispiels soll die Vorgehensweise zur skuzesiven Gewinnung einer Reihenfolge, die Beziehung 4.5.1 - 7 genügt, verdeutlicht werden.

Hierzu sei nur eine Bedienstungsstation betrachtet, auf der drei Leistungen erbracht werden sollen. Es wird sozusagen aus dem Graphen $Z \cup D$ ein Teilgraph herausgegriffen, dessen

drei überlappende Tätigkeiten noch nicht in eine eindeutige Reihenfolge geordnet worden sind (Abb. 4.5.2 - 2).

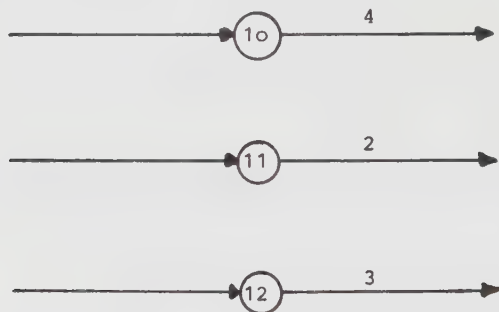


Abb. 4.5.2 - 2: Teilgraph für 1 Bedienstung und 3 Tätigkeiten¹⁾

Damit ist $S_m = \{10, 11, 12\}$.

Man wählt nun zwei Tätigkeiten aus, z.B. 10 und 11, und bringt sie in eine eindeutige Reihenfolge. Der Wahlmodus selbst hat nur einen begrenzten, in diesem Zusammenhang nicht weiter wesentlichen Einfluß auf das Verfahren. Er wird in Abschnitt 4.6.4.2 dargestellt.

Es sind dann zwei Fälle zu unterscheiden:

- a) Reihenfolge 10 - 11, d.h. die Kante (10,11) wird einbezogen,
- b) Reihenfolge 11 - 10, d.h. die Kante (11,10) wird einbezogen.

Betrachtet man zunächst den Fall a) (Abb. 4.5.2 - 3).

1) An den entsprechenden Kanten werden hier und im Folgenden die Tätigkeitsdauern in Zeiteinheiten angetragen, in Abb. 4.5.2 - 2 jedoch nur solche, die zur Erläuterung notwendig sind.

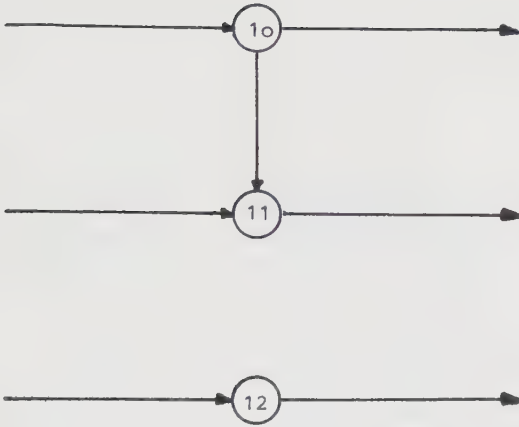


Abb. 4.5.2 - 3: Fall a), $Z \cup \{(10, 11)\}$

Der Beginnzeitpunkt von Tätigkeit 10 ist dann t_{10} , von Tätigkeit 11 $t_{11} = t_{10} + 4$ von Tätigkeit 12 t_{12} , wobei $t_{12} < t_{10} + 4$ sei.

Abb. 4.5.2 - 4 veranschaulicht diesen Sachverhalt:

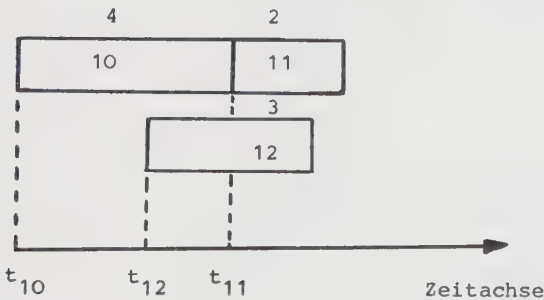


Abb. 4.5.2 - 4: Fall a) Balkendiagramm für die Beginnzeitpunkte des Graphen $Z \cup \{(10, 11)\}$

Prüft man gemäß Beziehung (4.5.1 - 7), ob noch weitere, überlappende Tätigkeiten einzuordnen sind, so ergibt sich:

$$t_{12} - t_{10} \neq d_{10\ 12} = 4$$

und

$$t_{11} - t_{12} \neq d_{12\ 11} = 3$$

Das bedeutet, daß immer noch die Tätigkeiten 10 und 11 mit Tätigkeit 12 überlappen. Man wählt nun wiederum entweder 10 und 12 oder 11 und 12 aus und bringt sie in eine eindeutige Reihenfolge.

Entscheidet man sich für 10 und 12, ergeben sich wieder zwei Möglichkeiten. Nämlich die Einbeziehung der disjunkten Kanten (10,12) - Fall aa) - oder (12,10) - Fall ab) - in den Graphen $Z \cup D$. Zieht man zuerst (10,12) ein, so gelangt man zu folgendem Graph (Abb. 4.5.2 - 5):

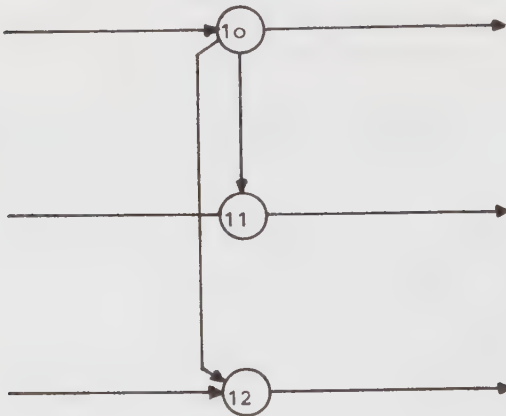


Abb. 4.5.2 - 5: Fall aa) $Z \cup \{(10,11), (10,12)\}$

Der Beginnzeitpunkt von Tätigkeit 10 ist t_{10} , von Tätigkeit 11 $t_{11} = t_{10} + 4$, von Tätigkeit 12 $t_{12} = t_{10} + 4$.

Trägt man diesen Sachverhalt als Balkendiagramm auf, so ergibt sich folgendes Bild (Abb. 4.5.2 - 6):

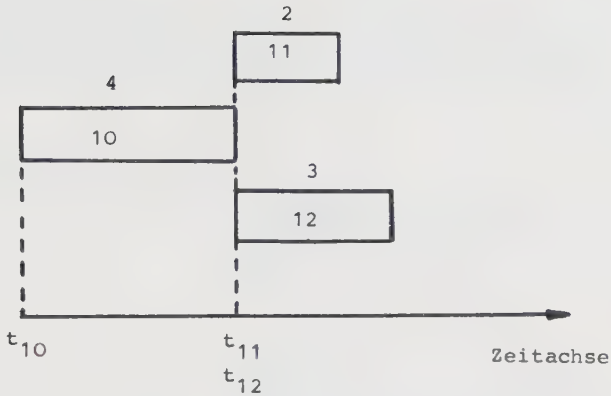


Abb. 4.5.2 - 6: Balkendiagramm für die Beginnzeitpunkte des Graphen $Z \cup \{(10,11), (10,12)\}$

Wie man sieht, überlappen sich die Tätigkeiten 11 und 12 immer noch. In einem letzten Schritt bringt man diese beiden Tätigkeiten in eine eindeutige Reihenfolge. Hierzu wird zuerst die Kante $(11,12)$ - Fall aaa) - in $Z \cup D$ eingezo-gen (Abb. 4.5.2 - 7):

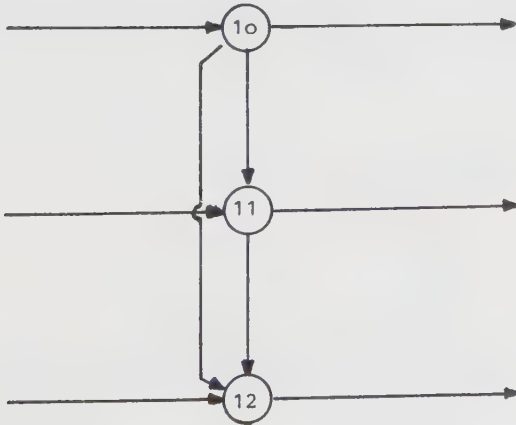


Abb. 4.5.2 - 7: Fall aaa), $Z \cup \{(10,11), (10,12), (11,12)\}$

Das Balkendiagramm zeigt nun drei eindeutig zugeordnete Tätigkeiten in der Reihenfolge 10 - 11 - 12 mit den Beginnzeitpunkten t_{10} , $t_{11} = t_{10} + 4$, $t_{12} = t_{11} + 2 = t_{10} + 4 + 2$ (Abb. 4.5.2 - 8):

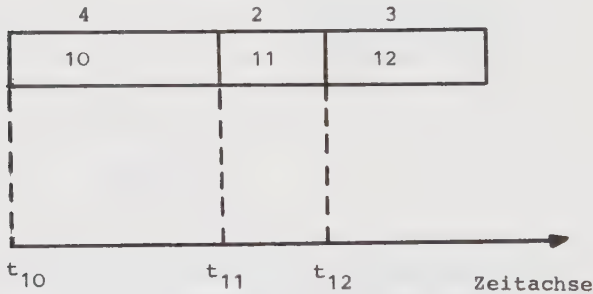


Abb. 4.5.2 - 8: Balkendiagramm für die Beginnzeitpunkte des Graphen $Z \cup \{(10,11), (10,12), (12,11)\}$

Dies ist jedoch nur eine der insgesamt $3! = 6$ maximal möglichen, verschiedenen Reihenfolgen der drei Tätigkeiten.

Die Einbeziehung der zu (11,12) alternativen Kante (12,11) - Fall aab) - führt sofort zu einer weiteren Reihenfolge 10 - 12 - 11. Den entsprechenden Graph $Z \cup \{(10,11), (10,12), (12,11)\}$ zeigt Abb. 4.5.2 - 9:

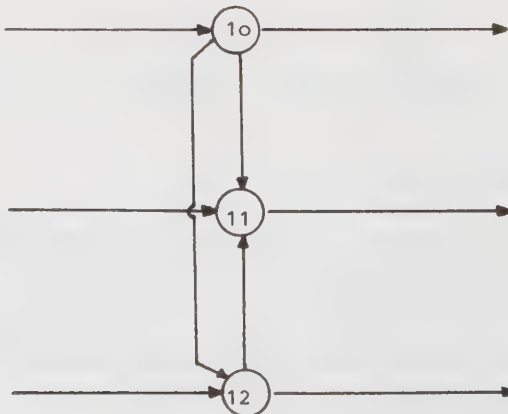


Abb. 4.5.2 - 9: Fall aab), $Z \cup \{(10,11), (10,12), (12,11)\}$

Geht man zu Fall aa) zurück und zieht statt der Kante (10,12) die Alternative (12,10) ein, - Fall ab) - so erhält man sofort eine eindeutige Reihenfolge 12 - 10 - 11 mit t_{12} , $t_{10} = t_{12} + 3$, $t_{11} = t_{10} + 4 = t_{12} + 3 + 4$.

Der entsprechende Graph ist in Abb. 4.5.2 - 10 zu sehen.

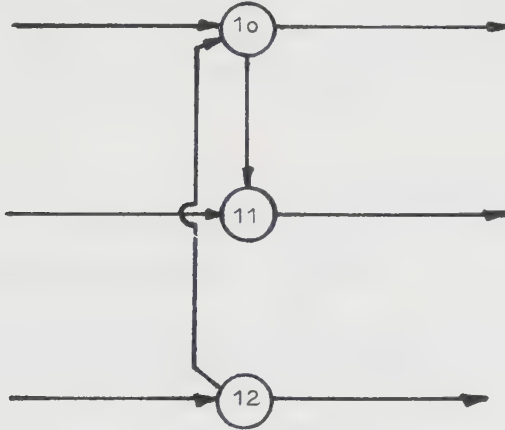


Abb. 4.5.2 - 10: Fall ab), $Z \cup \{ (10,11), (12,10) \}$,
Reihenfolge 12 - 10 - 11

Die restlichen drei Reihenfolgen erhält man durch das Einbeziehen der Kante (11,10) - Fall b).

Die sich daraus ergebenden Graphen sind in den Abb. 4.5.2 - 11 bis 4.5.2 - 13 aufgezeichnet.

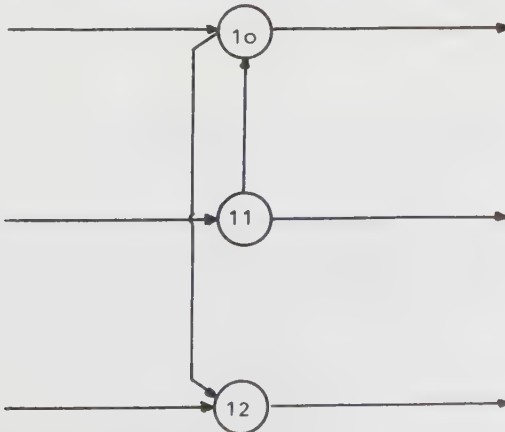


Abb. 4.5.2 - 11: Fall ba), $Z \cup \{ (11,10), (10,12) \}$, Reihen-
folge 11 - 10 - 12

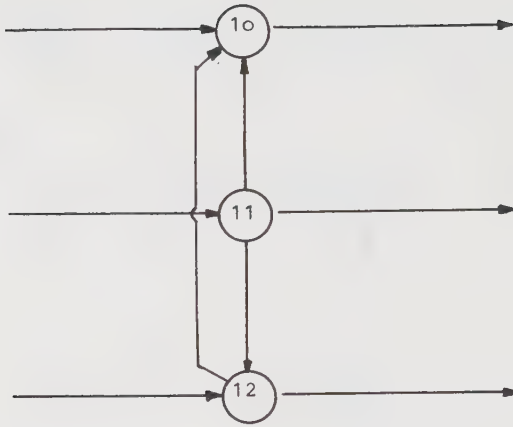


Abb. 4.5.2 - 12: Fall bba), $Z \cup \{ (11,10), (12,10), (11,12) \}$,
Reihenfolge 11 - 12 - 10

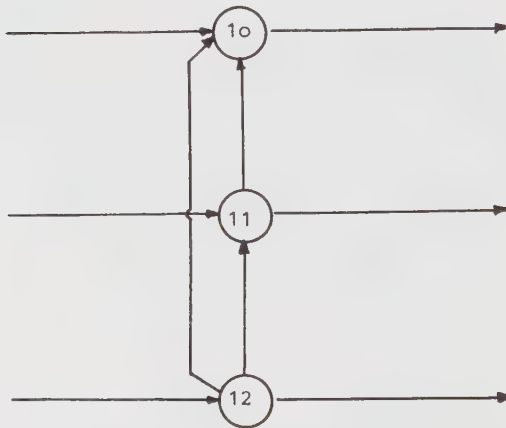


Abb. 4.5.2 - 13: Fall bbb), $Z \cup \{ (11,10), (12,10), (12,11) \}$,
Reihenfolge 12 - 11 - 10

Man kann ferner an diesen Beispielen erkennen, daß die Kreisfreiheit gesichert ist, da nur eine derartige Kantenfolge D eingezogen wird, die eine Tätigkeit entweder eindeutig vor oder nach einer anderen oder mehreren anderen Tätigkeiten einordnen. Damit ist aber eine zeitliche Abfolge festgelegt. Es werden dann nur solche Tätigkeiten betrachtet, die sich zeitlich überlappen. Es kann also nie geschehen, daß Anfangs- und Endknoten einer derartigen Kantenfolge D identisch sind, denn das würde bedeuten, daß absichtlich eine Überlappung erzeugt würde.

4.6 Lösung des Reihenfolge- und Terminierungsproblems

4.6.1 Bereitstellung der Ausgangsdaten

Die prinzipielle Lösung des vorliegenden Reihenfolge- und Terminierungsproblems soll nun an Hand eines übersichtlichen Beispiels aufgezeigt werden. Dazu ist die Zuordnung der Leistungen, die für einen Patienten zu erbringen sind, in den entsprechenden Leistungsstellen vorzugeben (Tab. 4.6.1 - 1).

Leistungsstelle m		1	2
Patient i	1	2	3
	2	4	5

Tab. 4.6.1 - 1: Beispiel für eine Zuordnung Patient - Leistungsstellen - Leistung

In obiger Tabelle sind die Leistungsstellen und die Patienten durch natürliche Zahlen gekennzeichnet.

Ebenso sind die $x_i \in X$ d.h. Leistungen bzw. Leistungsbeginn mit natürlichen Zahlen bezeichnet.

Allgemein sind den M Leistungsstellen und I Patienten $X = x_1, \dots, x_N$ Leistungen zugeordnet.

i \ m	1	.	.	.	.	.	M
	2	.	.	.	.	.	M - 1
1	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
I	.	.	.	.	.	.	N

Tab. 4.6.1 - 2: Zuordnung Patient - Leistungsstelle - Leistung allgemein

Dazu kommen im Falle des Beispiels von Tabelle 4.6.1 - 1 noch aus formalen Gründen¹⁾ fiktive Anfangsknoten 1 und Endknoten 6.

Den Leistungen x_i muß nun noch eine zeitliche Dauer $d_{x_i x_j}$ zugeordnet werden.

Dies geschieht in einer analogen Darstellungsweise in Tab. 4.6.1 - 3 bzw. 4.6.1 - 4.

i \ m	1	2
	2	3
1	2	3
2	7	5

Tab. 4.6.1 - 3: Zuordnung der zeitlichen Dauern der Leistungen für das Beispiel

Hierbei wurden in diesem Beispiel die Zeiten nicht als Zu-

1) Es ist genau ein Anfangs- und Endknoten nötig.

fallsvariable sondern als deterministische Größen angegeben.¹⁾

Tab. 4.6.1 - 3 zeigt die entsprechenden Werte für das Beispiel.

Im allgemeinen Fall ist jedem Element $x_i \in X$ d.h. den mit natürlichen Zahlen gekennzeichneten Leistungen eine zeitliche Dauer $d_{x_i x_j}$ zuzuordnen.

m \ i	1	.	.	.	.	M
1	.					.
.		.			.	
.			.	.		
.			.	.		
.			.	.		
.		.			.	
.	.					.
I						.

Tab. 4.6.1 - 4: Zuordnung der zeitlichen Dauern im allgemeinen Fall

4.6.2 Formale Darstellung des Problembeispiels

Nachdem die notwendigen Daten bereitgestellt sind, läßt sich das vorliegende Beispiel für ein Reihenfolge- und Terminierungsproblem im Krankenhaus gemäß Beziehung (4.2.2 - 1) formal darstellen:

$$(4.6.2 - 1) \quad ZF = t_6 \rightarrow \min!$$

$$(4.6.2 - 2) \quad \left. \begin{array}{l} t_{x_j} - t_{x_i} \geq d_{x_i x_j} \\ t_{x_i} - t_{x_j} \geq d_{x_j x_i} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \forall x_i, x_j \in S_m \\ (x_i, x_j) \in Z \cup D \end{array}$$

1) Die stochastische Natur des Problems wird in Abschnitt 4.10 behandelt.

$$Z = \{ (1,2), (1,4), (2,3), (3,6), (4,6), (5,6) \}$$

(4.6.2 - 3)

$$S_1 = \{ 2,4 \} \quad S_2 = \{ 3,5 \}$$

Es ist hierbei wieder Z die Kantenmenge des Ausgangsgraphen, D die Menge der disjunkten Kanten, die zur Reihenfolgefindung nötig sind. S_1 stellt die Menge der um die Leistungsstelle 1 miteinander konkurrierenden Leistungen dar. Sinngemäß ist S_2 zu interpretieren. Die Zielfunktion ZF ist ein Ausdruck für den frühest möglichen Endtermin t_6 , d.h. also den Zeitpunkt, zu dem die sämtlichen Leistungen 1 - 5 abgeschlossen sind. Dies entspricht der Minimierung der Gesamtdurchlaufzeit aller Patienten.

Die frühesten Beginnzeitpunkte der Leistungen t_{x_i} werden durch die bekannte rekursive Beziehung

$$(4.6.2 - 4) \quad t_{x_j} = \max_i \{ t_{x_i} + d_{x_i x_j} \}$$

$$(x_i, x_j) \in Z \cup D \quad \text{mit } t_{x_1} = 0$$

errechnet.

Das durch (4.6.2 - 2) und (4.6.2 - 3) beschriebene Problem kann durch folgenden disjunkten Graphen dargestellt werden:

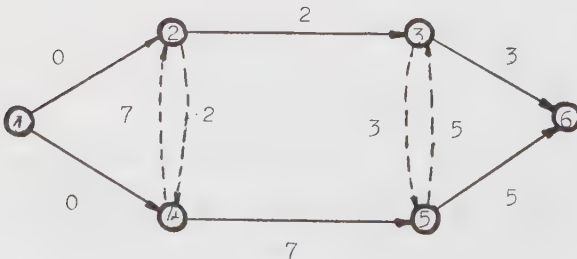


Abb. 4.6.2 - 1: Graph des Problembeispiels

Der obere Zweig mit den Leistungen zwei und drei stellt das

Leistungsspektrum für Patient 1, der untere Zweig mit den Tätigkeiten vier und fünf das Spektrum für den Patienten 2 dar. Die disjunkten Kantenpaare D sind gestrichelt gezeichnet.

4.6.3 Bestimmung der ersten zulässigen Lösung durch ein heuristisches Verfahren

Aus den in Abschnitt 4.3 geschilderten Gründen wurde ein heuristisches Verfahren zur Bestimmung der ersten zulässigen Lösung gewählt.

Die Vorgehensweise besteht darin, daß jeweils probeweise eine der disjunkten Kanten, die die Aufeinanderfolge zweier Leistungen festlegen können, in den Graph $Z \cup D$ einbezogen wird. Man ermittelt dafür den Wert der Zielfunktion ZF und wechselt diese Kante gegen ihre Alternative aus. Wieder wird der Wert ZF berechnet und mit dem des vorherigen Graphen verglichen.

Der Graph mit dem kleineren (besseren) der beiden Werte (Minimierungszielsetzung!) wird weiter zur Auffindung der zulässigen Lösung verwendet. Die schlechtere Alternative wird vorerst nicht weiter betrachtet. Eine Verbesserung eines einmal erreichten Zielfunktionswertes kann im Fall der obigen Zielfunktion $ZF = t_6$ durch das Einbeziehen von zusätzlichen Kanten nicht erreicht werden.

Im Falle des oben formulierten Beispiels geht man dann folgendermaßen vor:

Man beginnt mit der Ermittlung von $ZF = t_6$ für den Anfangsgraph Z^1) in Abb. 4.6.2 - 1. Es ergibt sich $t_6 = 12$.

Als erste Menge konkurrierender Tätigkeiten wird $S_1 = \{2, 4\}$ genommen. Führt man versuchsweise die Verbindung (2,4) ein, d.h. Leistung 2 (Patient 1) soll vor Leistung 4 (Patient 2) kommen, so ergibt sich $ZF = t_6 = 14$ (Abb. 4.6.3 - 1).

1) Ausgezogene Linien.

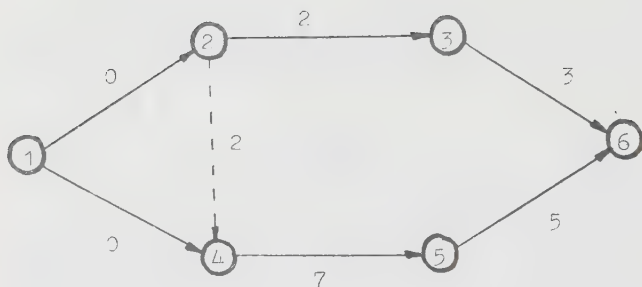


Abb. 4.6.3 - 1: Graph mit $Z \cup \{ (2,4) \}$

Wählt man die Alternative $(4,2)$, so ergibt sich $t_6 = 12$, d.h. keine Verschlechterung der Zielfunktion. Man wird daher die Verbindung $(4,2)$ wählen. Der Graph besteht nun aus der Kantenmenge $Z \cup \{ (4,2) \}$ (Abb. 4.6.3 - 2).

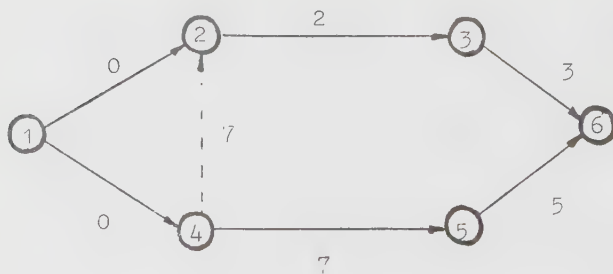


Abb. 4.6.3 - 2: Graph mit $Z \cup \{ (4,2) \}$

Geht man nun zu $S_2 = \{ 3,5 \}$ über, so ergibt sich für $(3,5)$ $t_6 = 17$ (Abb. 4.6.3 - 3), für die Alternative $(5,3)$ $t_6 = 15$. Es wird $(5,3)$ gewählt (Abb. 4.6.3 - 4). Damit ist eine zulässige Lösung erreicht, d.h. sämtliche Tätigkeiten sind in eine nach (4.6.2 - 2) definierte Reihenfolge gebracht.

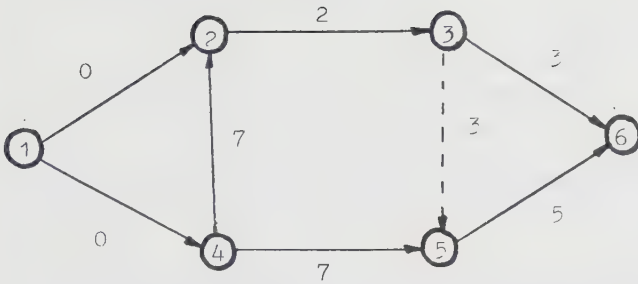


Abb. 4.6.3 - 3: Graph mit $Z \cup \{ (4,2), (3,5) \}$

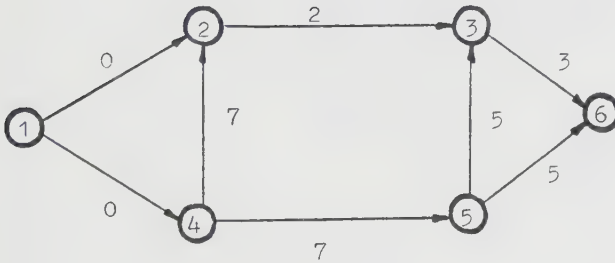


Abb. 4.6.3 - 4: Graph mit $Z \cup \{ (4,2), (5,3) \}$

Da bei jeder Prüfung des Zielfunktionswertes der jeweiligen alternativen Graphen immer beide disjunkte Kanten nacheinander einbezogen werden, ist ihre Reihenfolge ohne Bedeutung.

4.6.4 Eine Branch-and-Bound - Verfahren zur Ermittlung der optimalen Lösung

Soweit keine heuristischen Methoden¹⁾ für das allgemeine Reihenfolgeproblem vorgeschlagen werden, dominieren bei der Suche nach der exakten Lösung Branch and Bound-Verfahren zur Lösung graphentheoretisch bzw. kombinatorisch formulierter Ansätze.²⁾

Fast alle Verfahren haben den Nachteil, daß sie nur für Probleme mit wenigen Anforderungen und wenigen Geräten erprobt wurden.³⁾ Charlton und Death⁴⁾ schlagen ein spezielles Branch-and-Bound-Verfahren vor, das nach ihrer numerischen Erfahrung⁵⁾ am effizientesten arbeitet. Daher wurde dieser Algorithmus - allerdings in abgewandelter Form - als Grundlage des vorgeschlagenen Verfahrens gewählt.

4.6.4.1 Die Branch- and-Bound-Methode⁶⁾

4.6.4.1.1 Die allgemeine Methode

Mit Hilfe der Branch-and-Bound-Methode soll allgemein folgende Aufgabe gelöst werden:

Gegeben seien endlich viele verschiedene Problemlösungsmöglichkeiten a . Jedem a kann eine Bewertung $f(a)$ zugeordnet werden. Die Funktion $ZF(a)$ kann als Zielfunktion interpretiert werden. Es ist dasjenige a^* gesucht, für das $ZF(a^*)$ den kleinsten Wert annimmt. Formal angeschrieben lautet dies: Gegeben ist die Menge der Problemlösungen a , wobei $|a|$ endlich.

1) Etwa Krone, Steiglitz (1974).

2) Vgl. etwa Ashour, Parker (1972); Balas (1970); Florian, Trepant, McMahon (1971); Gorenstein (1972); Greenberg (1968); Gupta (1969); Raimond (1969); Rubow (1969).

3) Eine Ausnahme stellt Liesegang (1974) dar, der Probleme mit fünf Geräten und 100 Anforderungen mit Hilfe eines Approximationsverfahrens löst. Auf dieses Verfahren wird weiter unten eingegangen.

4) Charlton, Death (1970).

5) Ebenda, S. 191 f.

6) Die Darstellung folgt im wesentlichen der von Liesegang (Liesegang, a.a.O., S. 23 ff) vorgeschlagenen.

Es ist ZF: $a \rightarrow \mathbb{R}$

gesucht ist ein $a^* \in A$, für das gilt

$$\begin{aligned} \text{ZF}(a^*) &= \min_{a \in A} \text{ZF}(a) \\ a &\in A \end{aligned}$$

4.6.4.1.2 Zerlegungsstruktur

Zur Lösung dieses Problems wird der Lösungsbereich in Teilbereiche zerlegt. Es stellt sich eine Zerlegungsstruktur ZS ein, die wie folgt definiert ist:

$P(A)$ ist die Potenzmenge¹⁾ von A (A = Menge aller zulässigen Lösungen)
ZS ist Teilmenge von $P(A)$, wenn gilt

(i) $A \in \text{ZS}$

(ii) Ist $B \in \text{ZS}$ und $|B| > 1$, dann ist
 $c \in \mathbb{N}$, $c \geq 2$ und eine Zerlegung
 $(B_1, \dots, B_c)$ von B mit B_i ²⁾ $\in \text{ZS}$

(iii) $B_i \neq \emptyset$ für $i = 1, \dots, c$

(iv) $\bigcup_{i=1}^c B_i = B$

(v) $B_i \cap B_j = \emptyset$ für $i \neq j$; $i, j = 1, \dots, c$

Insbesondere ist $\{a\} \subset A$ ein Element der Zerlegungsstruktur. $\{a\}$ besteht dabei nur aus dem Element $a \in A$.

Eine konkrete Zerlegungsstruktur richtet sich jeweils nach dem gegebenen Problem, hier also nach der Struktur des durch einen disjunkten Graphen abgebildeten Reihenfolgeproblems.

4.6.4.1.3 Zerlegungsprozeß

Die Zerlegungsstruktur ZS, die im vorausgehenden Abschnitt auf der Menge A definiert wurde, dient im Branch-and-Bound-

1) Menge aller Teilmengen von A .

2) Die Indices i und j sollen im Abschnitt 4.6.4.1 die Elemente der Zerlegungsstruktur allgemein kennzeichnen. Sie haben hier nicht die Bedeutung Patient bzw. Leistung wie in den vorherigen Abschnitten.

Verfahren dazu, schrittweise Zerlegungen $(B_1, \dots, B_c) \in ZS$ zu finden. Dazu wird auf der ersten Stufe die Menge A in c B_i Teilmengen zerlegt. Es gilt $2 \leq c \leq n$.

Dabei stellt n die problemspezifische maximale Zahl von Zerlegungsschritten dar. Auf der nächsten Stufe des Zerlegungsprozesses wird aus den Teilmengen B_i^1 der Stufe 1 erneut eine Zerlegung $B^2 \in ZS$ ausgewählt.

Dieser Prozeß wiederholt sich solange, bis auf der letzten Stufe E nur noch einelementige Teilmengen $B_i^E = \{a\}$ übrig sind.

Zusammen mit der noch zu behandelnden Beschränkungsfunktion bestimmt die Effizienz der Zerlegungsstruktur die Güte eines Branch-and-Bound-Verfahrens.

Der Zerlegungsprozeß kann anschaulich in der Form eines Baumes¹⁾ dargestellt werden, d.h. als eine spezielle Form eines gerichteten, endlichen Graphen.²⁾ Hierbei stellen die Knoten jeweils die Teilmengen B_i^v auf den einzelnen Stufen v des Prozesses dar. Ein B^v auf der Stufe v ist dabei identisch mit einem B_i^{v-1} auf der Stufe $v-1$.

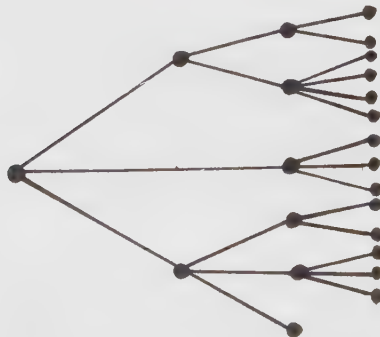


Abb. 4.6.4.1.3 - 1: Zerlegungsprozeß als Baum

- 1) Die Definition eines Baumes wurde schon in Abschnitt 4.5 angegeben.
- 2) Die Interpretation des Reihenfolgeproblems als Graph sollte jedoch nicht mit der Darstellung der Zerlegungsstruktur als Baum verwechselt werden.

4.6.4.1.4 Beschränkungsfunktion

Um zu vermeiden, daß die gesamte Zerlegungsstruktur nach der optimalen Lösung durchsucht wird, führt man eine Beschränkungsfunktion ein, die jene Teilbereiche, in denen das Optimum mit Sicherheit nicht zu finden ist, aussondert.

Die Definition dieser Funktion lautet:

Gegeben sei wieder der Lösungsbereich A,
eine Funktion ZF: $A \rightarrow \mathbb{R}$.

- (i) Eine Funktion $b : ZS \rightarrow \mathbb{R}$ heißt Beschränkungsfunktion für f, wenn

$$\forall B^v \in ZS \text{ und } \forall a \in B^v \text{ gilt} \\ ZF(a) \geq b(B^v)$$

- (ii) b ist monoton, wenn für $B^v, B^x \in ZS$
mit $B^v \subset B^x$ gilt $b(B^v) \geq b(B^x)$

4.6.4.1.5 Entscheidungsprozeß

Die Vorgehensweise beim Branch-and-Bound-Verfahren besteht nun darin, daß ein möglichst kleiner Teil der gesamten Zerlegungsstruktur nach der optimalen Lösung durchsucht wird. Dazu werden diejenigen Teilbereiche B mit der Beschränkungsfunktion $b(B)$ nicht untersucht, wenn alle Funktionswerte $ZF(a)$ der Lösungen $a \in B$ größer als b und damit größer als die Optimallösung sind. Der Wert b stellt damit eine untere Schranke für die Werte $ZF(a)$ dar. Da diese untere Schranke für die B am Beginn des Verfahrens noch nicht bekannt ist, wird eine obere Schranke $S = \infty$ gesetzt. Ist im Laufe des Prozesses erstmals eine Lösung a mit $ZF(a)$ erreicht, wird $S = ZF(a)$ gesetzt. Die bisher beste Lösung a wird abgespeichert. Auf jeder Stufe des Prozesses wird nun abgefragt, ob für einen Teilbereich $B_i \in B$ $b(B_i) \geq S$ gilt. Ist dies richtig, gibt es keine Lösung $a \in B_i$ mit einem $ZF(a)$ das kleiner als S ist. Damit braucht B_i nicht weiter durchsucht zu werden.

Diejenigen B_i , für die $b(B_i) < S$ gilt, müssen weiter ver-

Verfahren dazu schrittweise Zerlegungen $(B_1, \dots, B_c) \in \text{ZS}$ zu finden. Dazu wird auf der ersten Stufe die Menge A in c B_i Teilmengen zerlegt. Es gilt $2 \leq c \leq n$.

Dabei stellt n die problemspezifische maximale Zahl von Zerlegungsschritten dar. Auf der nächsten Stufe des Zerlegungsprozesses wird aus den Teilmengen B_i^1 der Stufe 1 erneut eine Zerlegung $B_i^2 \in \text{ZS}$ ausgewählt.

Dieser Prozeß wiederholt sich solange bis auf der letzten Stufe E nur noch einelementige Teilmengen $B_i^E = \{a\}$ übrig sind.

Zusammen mit der noch zu behandelnden Beschränkungsfunktion bestimmt die Effizienz der Zerlegungsstruktur die Güte eines Branch-and-Bound-Verfahrens.

Der Zerlegungsprozeß kann anschaulich in der Form eines Baumes¹⁾ dargestellt werden, d.h. als eine spezielle Form eines gerichteten, endlichen Graphen.²⁾ Hierbei stellen die Knoten jeweils die Teilmengen B_i^v auf den einzelnen Stufen v des Prozesses dar. Ein B_i^v auf der Stufe v ist dabei identisch mit einem B_i^{v-1} auf der Stufe $v-1$.

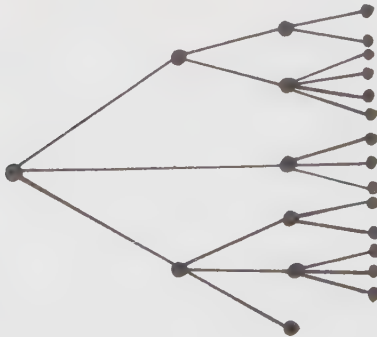


Abb. 4.6.4.1.3 - 1: Zerlegungsprozeß als Baum

- 1) Die Definition eines Baumes wurde schon in Abschnitt 4.5 angegeben.
- 2) Die Interpretation des Reihenfolgeproblems als Graph sollte jedoch nicht mit der Darstellung der Zerlegungsstruktur als Baum verwechselt werden.

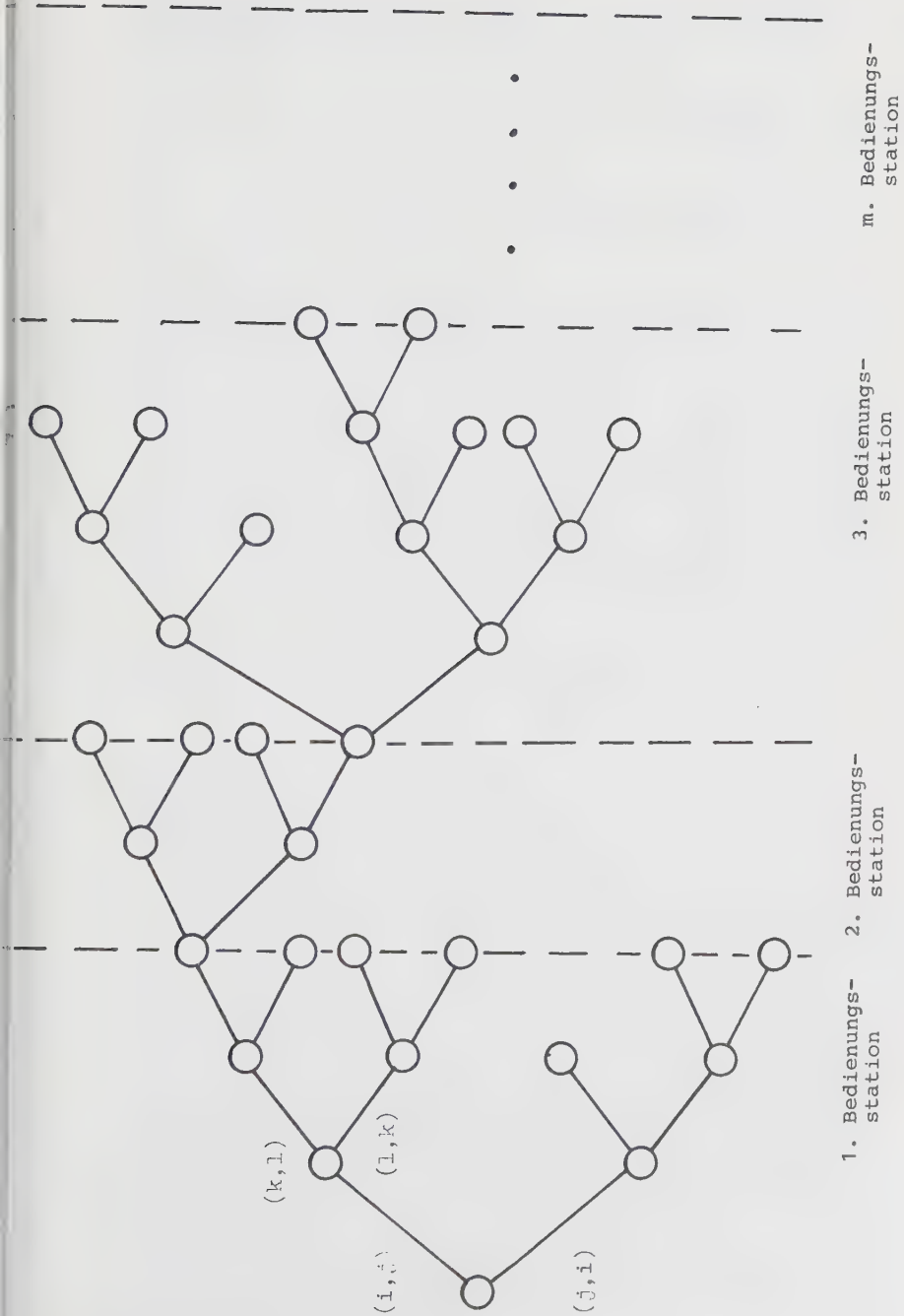


Abb. 4.6.4.2 - 1: Graphische Darstellung der Zerlegungsstruktur des Reihenfolgeproblems als Entscheidungsbaum.

daß jeweils zwei Zweige von einem Knoten des Entscheidungsbaums ausgehen, erklärt sich durch die Struktur des disjunkten Graphen. Ein Zweig umfaßt alle Lösungen, die die Kante (i,j) beinhalten. Der alternative Zweig enthält die Lösungen mit der disjunkten Kante (j,i) . Man kann dies formal wie folgt darstellen:

Ist S_m die Menge der sich überschneidenden Leistungen in der Bedienstationsstation m , so ist

$V_{qm} = (v_1, \dots, v_q)$ Variation aus $|S_m|^{(1)}$ für $1 \leq q \leq |S_m|$
 und $B_{V_{qm}}^{(2)} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Reihenfolge von Leistungen in der Bedienstationsstation } m, \\ \text{die mit der Reihenfolge } V_{qm} \text{ beginnen} \end{array} \right\}$

Das zweite Kriterium bezieht sich nicht nur auf eine, sondern alle Bedienstationsstationen. Für jede dieser Bedienstationsstationen gilt nun wieder die oben erläuterte Zerlegung.

Ihre Reihenfolge ist grundsätzlich beliebig. Sie muß nur am Beginn des Entscheidungsprozesses festgelegt werden.

Allgemein lautet die Zerlegungsstruktur damit

$$(4.6.4.2 - 1) \quad ZS = \left\{ \left\{ a \right\} \cup B_{V_{qm}} \mid V_{qm} \in M \text{ mit } 1 \leq q \leq |S_m| \right\}$$

Abb. 4.6.4.2 - 1 veranschaulicht die Zerlegungsstruktur in Auszügen. Deutlich ist die sequentielle Struktur des Problems zu sehen. Die im Bereich der zweiten und dritten Bedienstationsstation gezeichneten Teilbäume sind - völlig identisch - an jeden Endknoten der vorangegangenen Bedienstationsstationen ange-setzt zu denken. Die Zahl der Zerlegungen $B_{V_{qm}}$ ist beschränkt, da die disjunkte Kantenmenge D endlich ist.

-
- 1) Unter einer Variation aus $|S_m|$ ist eine Anordnung sämtlicher Elemente der Indexmenge $|S_m|$ ohne Wiederholung zu verstehen.
 - 2) $B_{V_{qm}}$ ist damit auch identisch mit einer nicht-zulässigen Lösung, d.h. es sind zwar einige, aber noch nicht alle Leistungen in eine Reihenfolge gebracht, die Beziehung (4.5.1 - 7) befriedigen. Gleichzeitig ist $B_{V_{qm}}$ als Zerlegung zu interpretieren.

Die Beschränkungsfunktion¹⁾ $b(B)$ wird nun auf Grund der oben angegebenen Zerlegungsstruktur $ZS\ b(B_{V_{qm}})$ geschrieben.

Laut Definition der Beschränkungsfunktion muß gelten

$ZF(a) \geq b(B_{V_{qm}})$. Dies ist ohne weiteres klar, da, wie schon

erwähnt, eine zusätzliche Einbeziehung von disjunkten Kanten in den Graphen Z allenfalls einen höheren, d.h. schlechteren Wert als den Wert der Beschränkungsfunktion $b(B_{V_{qm}})$ liefert.

Die Monotonie der Beschränkungsfunktion²⁾ ist aus demselben Grund offensichtlich, denn mit $B_{V_q} \subset B_{V_p}$ gilt $b(B_{V_q}) \geq b(B_{V_p})$, da dies identisch ist mit dem Einbeziehen einer oder mehrerer disjunkter Kanten.

Um den Verzweigungsprozeß durchführen zu können, muß nun noch eine Vorschrift angegeben werden, die festlegt, welche der überlappenden Tätigkeiten als nächste eingeplant werden soll und welcher der beiden alternativen Zweige von einem Knoten des Entscheidungsbaumes aus beschritten werden soll.

Hierzu wird eine Hierarchie von heuristischen Regeln definiert. Es wird jeweils die Tätigkeit ausgewählt, die

1. von demjenigen der beiden Knoten mit dem frühesten Beginnzeitpunkt t_{x_i} abgeht oder
2. die kürzeste Dauer $d_{x_i x_j}$ oder
3. die niedrigste Numerierung aufweist.

Diese Heuristik soll sicherstellen, daß immer in dem Zweig mit der Suche nach einer zulässigen Lösung fortgefahren wird, der die größte Chance verspricht, zu einem verbesserten Zielfunktionswert ZF zu führen.³⁾ Nachdem eine erste zulässige

1) Vgl. Abschnitt 4.6.4.1.4.

2) Die Monotonie ist jedoch nur im Fall einer Zielfunktion, die nur aus Durchlaufzeiten besteht, gewährleistet. Aus diesem Grunde kann das Branch-and-Bound-Verfahren nicht auf Leerzeit-Kriterien angewendet werden. Siehe dazu Abschnitt 4.12.

3) Die erste Regel ist selbsterklärend. Die zweite Regel soll bewirken, daß die Zielfunktion möglichst wenig verschlechtert wird. Dies geschieht durch Einfügung von kurzen Tätigkeitsdauern. Durch die dritte Regel wird erreicht, daß sämtliche Tätigkeiten in eine eindeutige Reihenfolge gebracht werden, wenn dies durch die erste und zweite Regel noch nicht geschehen ist.

Lösung erreicht wurde, wird mit Hilfe dieser Heuristik der Entscheidungsbaum durchsucht.¹⁾

Ein Abbruch der Suche in einem Zweig erfolgt dann, wenn entweder eine neue, zulässige Lösung auftritt oder der Wert der Beschränkungsfunktion $b(B_{v_{\text{gem}}})$ größer oder gleich dem Wert der Schranke S ist, die dem Zielfunktionswert der letzten zulässigen Lösung entspricht.²⁾ Dann steigt man auf dem Entscheidungsbaum solange zurück, bis ein Aufwärtssteigen wieder möglich ist. Ist die Suche wieder in der Wurzel des Entscheidungsbaumes angekommen und sind keine Zweige mehr zu durchsuchen, bricht der Algorithmus ab. Die bisher beste Lösung ist dann optimal.

4.6.4.3 Aufsuchen der optimalen Lösung für das Beispiel in Abschnitt 4.6.3

Im nachstehenden Abschnitt soll nun der im Abschnitt 4.6.4.2 dargelegte Entscheidungsprozeß an Hand des Beispiels aus Abschnitt 4.6.3 veranschaulicht werden.

Die Zerlegungsstruktur zeigt Abb. 4.6.4.3 - 1:

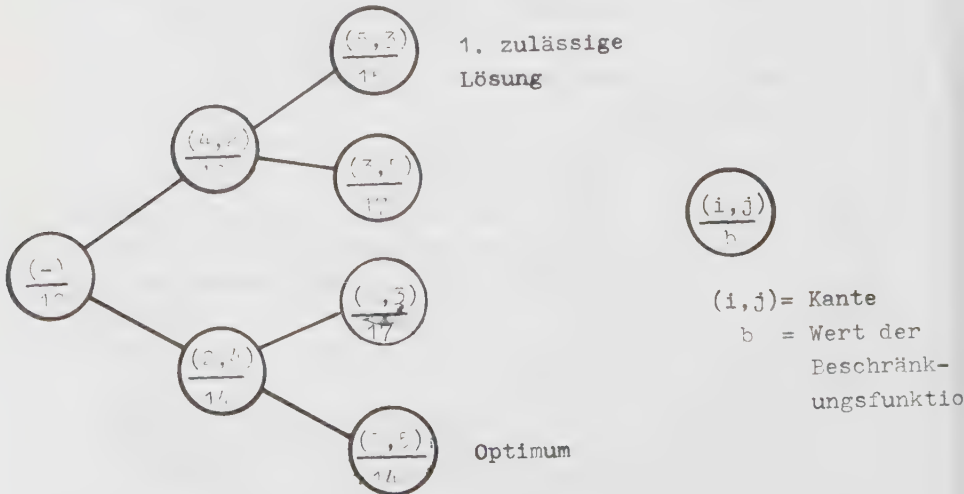


Abb. 4.6.4.3 - 1: Entscheidungsbaum des Beispiels

1) Siehe Abschnitt 4.6.4.1.5.

2) Bis zur ersten, zulässigen Lösung werden die Tätigkeiten aus Gründen der Einfachheit in der Reihenfolge ihrer Beginnzeitpunkte im Graphen Z ausgewählt.

Eine erste zulässige Lösung ergab sich in Abschnitt 4.6.3 in Form des Graphen $ZV\{(4,2), (5,3)\}$ (Abb. 4.6.3 - 4).

Sie ist in Abb. 4.6.4.3 - 1 im Entscheidungsbaum vermerkt.

Danach wird der Entscheidungsbaum zunächst bis zum Knoten mit (4,2) und $b=12$ zurückverfolgt. Da jedoch Knoten (3,5) mit $b=17$ schon inspiziert wurde, steigt man den Baum bis zum Ausgangsknoten zurück und wendet sich dem Zweig mit (2,4) zu. Das bedeutet, daß sämtliche disjunkten Kanten gelöscht werden und dafür die Kante (2,4) eingezeichnet. Der Wert der Beschränkungsfunktion ist hier 14. Dann ist die Wahl zwischen den Zweigen mit den Kanten (5,3) und (3,5) zu treffen. Laut oben erwähnter Heuristik wird zuerst der Zweig untersucht, der den niedrigsten Wert für seinen Beginnzeitpunkt aufweist. In diesem Fall ist dies der Zweig mit (3,5).

Damit ergibt sich ein Graph mit $ZV\{(2,4), (3,5)\}$ und $f(a) = 14$ (Abb. 4.6.4.3 - 2).

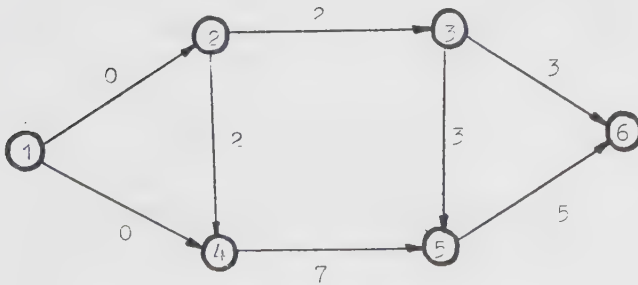


Abb. 4.6.4.3 - 2: Graph der optimalen Lösung

Nun wäre noch der alternative Zweig mit (5,3) zu untersuchen. Da aber eine neue, zulässige Lösung mit einem verbesserten Zielfunktionswert erreicht wurde, wird auch die Schranke S auf diesen Wert herabgesetzt. Steigt man nun zum Knoten mit (2,4) zurück, so ist der Wert der Beschränkungsfunktion dort 14, d.h. nicht kleiner als der Wert von S und damit braucht der Zweig mit (5,3) nicht mehr betreten zu werden. Vielmehr kehrt man zur Wurzel zurück. Da keine wei-

teren Zweige zu durchsuchen sind, bricht der Algorithmus ab. Die beste gefundene Lösung ist der Graph mit $ZU \{ (2,4), (3,5) \}$ und $ZF=14$ und damit die optimale Lösung.

Hierbei wird Patient 1 in der Bedienstationsstation 1 beginnend zum Zeitpunkt 0 2 Zeiteinheiten behandelt und wird dann in der Bedienstationsstation 2 drei Zeiteinheiten behandelt.

Patient 2 wird erst nachdem die Untersuchung von Patient 1 beendet ist in der Bedienstationsstation 1 untersucht. In der Bedienstationsstation 2 tritt für ihn keine Wartezeit auf, da dort die Behandlung von Patient 1 schon beendet ist. Für die Bedienstationsstation 2 ist jetzt allerdings eine Leerzeit von vier Zeiteinheiten entstanden.

Tab. 4.6.4.3 - 1 zeigt den optimalen Reihenfolge- und Terminplan.

Patient	Leistung	Leistungsstelle	Beginn der Leistung nach t Zeiteinheiten
1	2	1	0
	3	2	2
2	4	1	2
	5	2	9

Tab. 4.6.4.3 - 1: Optimaler Reihenfolge- und Terminplan des Beispiels

Wie man leicht sieht, ist durch obiges Verfahren auch die Forderung nach Kreis-Freiheit eingehalten. Es werden sukzessive die sich überlappenden Tätigkeiten in den Graph ZUD einbezogen. Eine Tätigkeit kann hierbei immer nur entweder vor die bisher eingeplante Reihenfolge gesetzt werden oder an die bisher letzte Leistung angeschlossen werden. Damit ist ein Zyklus ausgeschlossen.

4.7 Ein Approximationsverfahren zur rechentechnischen Beschleunigung des Algorithmus

Die im Abschnitt 4.6.4.2 beschriebene Zerlegungsstruktur läßt erkennen, daß bei einem größeren Umfang des Reihenfolgeproblems unter Umständen unvertretbar lange Rechenzeiten vorkommen können.

Durch die im Abschnitt 4.4 erläuterten "Filter" bleiben die Werte $|S_m|$ zwar in engen Grenzen. Die Zahl der Bedienstationen bewegt sich in einem Krankenhaus in der Größenordnung von 20 - 30.

Obwohl ferner beim Branch-and-Bound-Verfahren viele Knoten nicht durchlaufen werden müssen, ist es für größere Probleme zweckmäßig, ein Näherungsverfahren zu verwenden, das mit einem geringeren Rechenaufwand noch eine akzeptable Lösung liefert.

Voraussetzung für die Verwendung eines Näherungsverfahrens ist, daß einmal definierte Vorstellungen über die Abweichung vom Optimum bestehen und man zum anderen auf die exakte Lösung verzichten kann.

Das letztere gilt sicher für die Patientenreihenfolgen, da marginale Abweichungen von der Zielfunktion auf die Problemlösung wenig Einfluß haben.

Das erstere wird durch die Art des Approximationsverfahrens, das hier angewendet wird, erfüllt.

Dazu wird eine ϵ -optimale Lösung definiert.

Es ist dies eine Lösung, die vom exakten Wert ZF einer bis zu einem bestimmten Punkt des Entscheidungsprozesses optimalen Lösung um höchstens ϵ abweicht, d.h. schlechter ist.

Beim Durchsuchen des Entscheidungsbaumes nach einer Verbesserung der bisherigen Lösung wird der Wert dieser ϵ -optimalen Lösung nun die Schranke S für die Suche in den Zweigen. Diejenigen Zweige, die nur noch eine Lösung erwarten lassen, die schlechter oder gleich S ist, werden nicht weiter berücksichtigt.

Diese ϵ -optimale Lösung kann nun dynamisiert werden. Je wei-

ter man bei der Suche fortschreitet, desto eher wird man die bisherige Lösung auf einen um wiederum ϵ schlechteren Wert setzen und mit diesem Verfahren fortsetzen. Dies kann in Abhängigkeit von der Zahl der durchlaufenen Knoten des Entscheidungsbaumes, oder in Abhängigkeit von der Zahl der gefundenen zulässigen Lösungen geschehen.

Im folgenden soll ein Beispiel für das Approximationsverfahren gegeben werden. Mit dem in Abschnitt 4.6.3 beschriebenen Verfahren hat sich bei der Lösung des Beispiels für ein Reihenfolgeproblem eine erste zulässige Lösung $ZU \{(4,2), (5,3)\}$ mit $ZF = 15$ eingestellt (Abb. 4.6.4.3 - 1). Da der Wert $ZF = 15$ identisch mit der Schranke S ist, wird $S = 15$ gesetzt. Man setzt nun beispielsweise $\epsilon = 1$. Damit gibt man sich zunächst mit einer Lösung zufrieden, deren Zielfunktion ZF maximal, d.h. schlechtestenfalls den Wert 15 annehmen kann, d.h. identisch mit der bisherigen Lösung ist.¹⁾ S wird also gleich 14 gesetzt. Weiter könnte man festlegen, daß nach jedem weiteren $|Z|$ durchsuchten Knoten, S erneut um $\epsilon = 1$ gesenkt wird. Führt man mit der Schranke $S = 14$ das oben beschriebene Branch-and-Bound-Verfahren durch, so stößt man bald auf den Knoten mit $(2,4)$ und $b = 14$. Da das Kriterium für den Abbruch der Suche in einem Zweig $S \geq b(B_v)$ lautet, werden alle Zweige, die von diesem Knoten ausgehen, nicht weiter verfolgt und damit ist in diesem Fall gleichzeitig der Algorithmus beendet.

Es hat sich gezeigt, daß zwei Zweige weniger zu durchsuchen waren. Dieser Effekt wirkt sich bei größeren Bäumen erheblich aus. Liesegang²⁾ weist nach, daß bei verschiedenen 15×5 Reihenfolgeproblemen die Rechenzeit für die Ermittlung einer Lösung, die maximal etwa vier Prozent ungünstiger als die Optimallösung ist, etwa $1/3$ der Rechenzeit für diese optimale Lösung beträgt.

Wie man sieht, kann damit das Branch-and-Bound-Verfahren wesentlich effizienter gestaltet werden. Außerdem ist eine

1) Sofern nicht mehrere gleichwertige Lösungen existieren, auf die man zufällig stößt.

2) Liesegang (1974), S. 153 und 161.

genaue Aussage über die Abweichung vom Optimum möglich. Ist nämlich das Verfahren beendet, so kann die optimale Lösung höchstens h_g von der letzten gefundenen zulässigen Lösung entfernt sein, wenn bis zum Abbruch des Verfahrens die letzte Lösung um h_g herabgesetzt wurde, wobei $h \in \mathbb{N}$ ist.

Wäre sie besser als $ZF-h_g$ würde die Suche ja noch fortgesetzt, wäre sie schlechter, so wäre der Abstand zur letzten Lösung sogar kleiner als h_g .

4.8 Reduktion des Graphen ZUD

Eine weitere Möglichkeit zur Beschleunigung des Rechenvorganges ist darin zu sehen, daß bei der Bestimmung des aktuellen Wertes der Zielfunktion sich Änderungen der t_{x_i} nur in einem bestimmten Bereich des Graphen abspielen. Das bedeutet, daß eine erneute Berechnung sämtlicher Beginnzeitpunkte überflüssig ist.

Anhand von Beispielen sollen die verschiedenen Fälle, bei denen beträchtliche Teile des Graphen bei der Ermittlung der Zielfunktion und der t_{x_i} unberücksichtigt bleiben können, aufgezeigt werden.

Gegeben sei wieder ein für das vorliegende Problem typischer Graph:

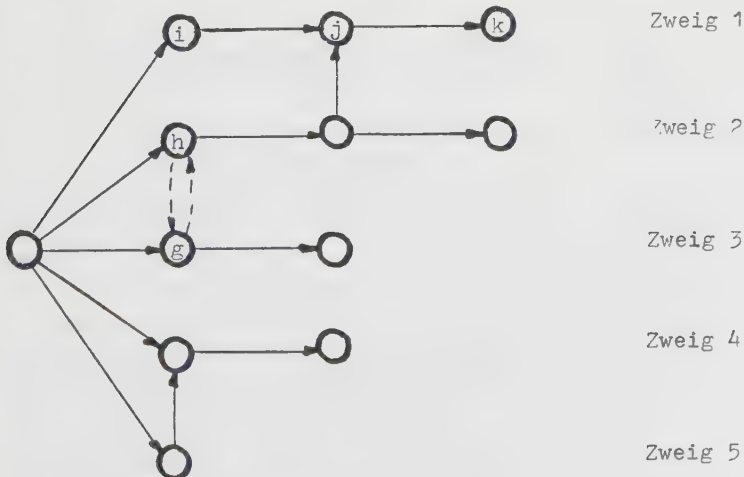


Abb. 4.8 - 1: Reduktion 1. Fall

1. Fall:

Es sind relativ wenige Untersuchungen in eine feste Reihenfolge gebracht, d.h. das Branch-and-Bound-Verfahren ist in der Nähe der Wurzel des Entscheidungsbaumes: Entscheidung zwischen zwei disjunkten Kanten zwischen Zweig zwei und drei. Dies kann zu Beginn der Rechnung sein, aber auch nachdem schon eine oder mehrere zulässige Lösungen gefunden wurden und im Verlaufe des Verfahrens der Entscheidungsbaum wieder nach unten durchlaufen wurde. Es ist aus Abb. 4.8 - 1 ersichtlich, daß nur für diejenigen Knoten des Graphen die t_{x_i} ermittelt werden müssen, die durch gerichtete Kanten direkt oder über andere Knoten in einer derartigen Verbindung stehen, daß sie zeitlich auf die Knoten der Zweige zwei und drei folgen.

Dies ist hier im Graphen in Abb. 4.8 - 1 für die Knoten j und k der Fall, nicht jedoch für Knoten i von Zweig eins und die Knoten der Zweige vier und fünf, wenn (g,h) gewählt wird. Zieht man die Kante (h,g) ein, so ändern sich nur die t_{x_i} im Zweig drei.

2. Fall:

Es sind gemäß Abb. 4.8 - 2 schon relativ viele Untersuchungen eingeplant.

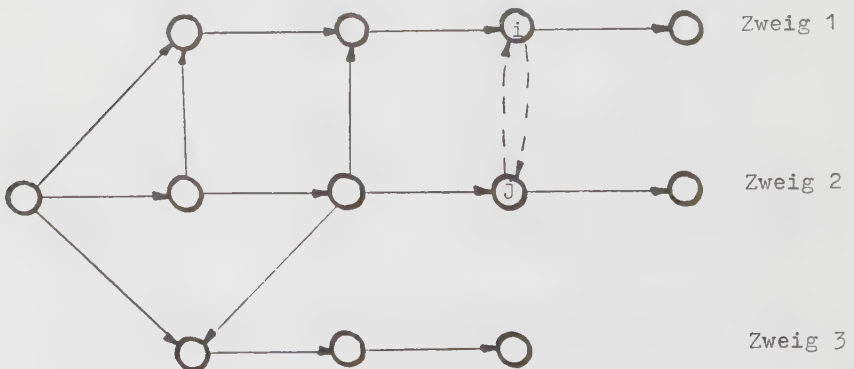


Abb. 4.8 - 2: Reduktion 2. Fall

Es soll nun eine Entscheidung zwischen den zwei Knoten i und j bezüglich ihrer Reihenfolge getroffen werden. Auch hier ist klar, daß nur die t_{x_i} für diese Knoten und ihre Nachfolger aber nicht für ihre sämtlichen Vorgänger errechnet werden müssen.

Damit ergibt sich eine beträchtliche Rechensparnis, da nur noch festgestellt werden muß, welche Nachfolger die konkurrierenden Knoten haben.

3. Fall:

Während bisher jeweils darauf verzichtet werden konnte, die von den durch Einbeziehen bzw. Entfernen von Kanten betroffenen Beginnzeitpunkte der Knoten neu zu berechnen, kann es Situationen geben, in denen sich sämtliche zu den nachfolgenden Knoten gehörigen Beginnzeitpunkte nicht ändern. Dies ist immer dann der Fall, wenn der Beginnzeitpunkt für den unmittelbaren Nachfolgerknoten sich nicht ändert, da dann infolge der Rechenvorschrift (4.6.2 - 4) auch die t_{x_i} dessen Nachfolgerknoten den ursprünglichen Wert behalten. Ferner behält die Zielfunktion ihren ursprünglichen Wert.

Damit ist aber auch eine Kombination des 1. und des 3. Falles bzw. des 2. und des 3. Falles möglich. Das bedeutet, daß u.U. nur ein Beginnzeitpunkt pro Entscheidungsbaumknoten zu berechnen ist.

4.9 Stochastische Tätigkeitsdauern

4.9.1 Zur Notwendigkeit eines stochastischen Reihenfolge- und Terminierungsmodells

Im Abschnitt 2 wurde schon erläutert, daß bei der Ablaufplanung im Krankenhaus nicht außer acht gelassen werden darf, daß die Tätigkeitsdauern Zufallsvariable sind. Dies steht im Gegensatz zur industriellen Fertigungssteuerung, die in diesem Punkt auf eine stochastische Betrachtungsweise verzichtet. Dementsprechend sind auch in der Literatur nur wenige und zudem noch auf spezielle Fälle abgestellte Arbeiten zu finden. Es wird jedoch lediglich der Fall $N \times 1$ (d.h. ein einziges Gerät, mehrere Anforderungen) untersucht und das Überkreuzen von Anforderungen wird ausgeschlossen.¹⁾ Damit

1) Banerjee (1965); Blau (1966); Crabill, Maxwell (1970); Goyal (1973); Rothkopf (1966).

sind diese Verfahren für das vorliegende Problem nicht zu verwenden. Ihre Erweiterung auf den allgemeinen $N \times M$ Fall dürfte weder methodisch noch rechenstechnisch erfolgversprechend sein. Auf die Notwendigkeit einer Berücksichtigung der Unsicherheit der medizinischen Tätigkeitsdauern soll nun näher eingegangen werden.

New¹⁾ kritisiert die weitverbreitete Ansicht, man könne bei Reihenfolgeproblemen ohne größere Bedenken auf den Mittelwert der Verteilungen von Tätigkeitsdauern zurückgreifen, da sich Überschreitungen dieses Wertes nach oben bzw. unten sozusagen "ausgleichen". Damit würde dann angeblich der effektive Fehler, setzt man nur möglichst viele Anforderungen voraus, gering werden. New weist schon für den Fall eines einzigen Gerätes nach, daß diese Annahme nicht zutrifft, sondern die Abweichfehler vom Mittelwert (bzw. seiner beliebigen Planzeit) einer Tätigkeitsdauer sich im Gegenteil kumulieren. Dazu wird vorausgesetzt, daß eine für alle zeitlichen Fehler (d.h. Abweichungen von der Planzeit) gleiche Fehlereinheit $\pm E$ existiert. E soll unabhängig von der jeweiligen Tätigkeitsdauer sein.

Nachdem N Anforderungen auf dem Gerät abgearbeitet sind, habe sich in r Fällen eine positive Abweichung (Überschreitung) von der Planzeit ergeben. Folglich trat in $N - r$ Fällen eine negative Abweichung (Unterschreitung) ein.

Der gesamte Fehler ist damit:

$$(4.9.1 - 1) \quad r E - (N - r) E = (2r - N) E$$

Bezeichnet man mit $P(X_N = xE)$ die Wahrscheinlichkeit, daß nach N Anforderungen der Gesamtfehler $X_N^{(2)}$ den Wert xE annimmt, ergibt sich

$$(4.9.1 - 2) \quad (2r - N) E = xE$$

und damit

$$(4.9.1 - 3) \quad r = \frac{1}{2} (N + x)$$

N und x müssen dabei jeweils beide gerade oder ungerade sein. Die Zahl der verschiedenen Kombinationen von positiven und negativen Abweichungen beträgt $\binom{N}{r} = \frac{N!}{r! (N-r)!}$.

1) New (1974).

2) Die Zufallsvariable X_N hat nichts mit der Punktmenge (Knotenmenge) X in Abschnitt 4.5 zu tun. Gleiches gilt für x .

Damit ergibt sich

$$(4.9.1 - 4) \quad P(X_N = xE) = \binom{N}{N+x} p^{\frac{N+x}{2}} q^{\frac{N-x}{2}}$$

wobei p die Wahrscheinlichkeit für eine positive Abweichung und q die Wahrscheinlichkeit für eine negative Abweichung bei jeweils einer Tätigkeit darstellt. Es muß $p+q=1$ gelten. Die Beziehung (4.9.1 - 4) stellt somit die Dichte einer Binomialverteilung dar.

Der Binomialkoeffizient ist 0 wenn $\frac{1}{2}(N+x)$ nicht ganzzahlig ist.

Für ein hinreichend großes N ¹⁾ geht die Binomialverteilung in eine Normalverteilung über²⁾

$$(4.9.1 - 5) \quad P(j < X_N < k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{4Np(1-p)}} \int_j^k \exp\left(-\frac{(t-N(2p-1))^2}{2 \cdot 4p(1-p) \cdot N}\right) dt$$

Erwartungswert $E(X_N)$ und Varianz $\text{Var}(X_N)$ der beiden Verteilungen sind jeweils identisch. Da sie etwas von denen der üblichen Binomialverteilungen abweichen und eine Herleitung bei New fehlt, soll eine einfache Ableitung angegeben werden.

Es wird vorausgesetzt, daß E eine Fehlereinheit ist, die auf 1 normiert sei. Damit ist der Fehler für eine Überschreitung der Planzeit $+1x$, für eine Unterschreitung $-1x$. Der für eine einzelne Anforderung i auftretende Fehler X_i ist also $+1$ oder -1 . Da sämtliche Fehler voneinander unabhängige Ereignisse sind, gilt wegen der Additionsregel für Erwartungswerte für den kumulierten Fehler

$$(4.9.1 - 6) \quad \hat{X}_N = X_1 + X_2 + \dots + X_N$$

Diese Zufallsgrößen X_i sind identisch verteilt nach

$$(4.9.1 - 7) \quad p(X_i = +1) = p, \quad p(X_i = -1) = 1 - p = q$$

Damit ergibt sich der Erwartungswert der binomialverteilten Zufallsgröße $\hat{X}_N$ zu

$$(4.9.1 - 8) \quad E(X_N) = E(X_1 + X_2 + \dots + X_N) = \\ = E(X_1) + E(X_2) + \dots + E(X_N)$$

1) New gibt den Wert 9 an.

2) Vgl. etwa Heinhold, Gaede (1972), S. 169.

Der Erwartungswert für X_i ist

$$(4.9.1 - 9) \quad E(X_i) = 1 \cdot p - 1 \cdot q = p - (1 - p) = 2p - 1$$

und damit

$$(4.9.1 - 10) \quad E(\hat{X}_N) = N (2p - 1)$$

Ähnlich errechnet sich die Varianz: Da die X_i unabhängig sind, gilt die Additionsregel für Varianzen

$$(4.9.1 - 11) \quad \begin{aligned} \text{Var}(\hat{X}_N) &= V(X_1 + X_2 + \dots + X_N) = \\ &= V(X_1) + V(X_2) + \dots + V(X_N) \end{aligned}$$

Aufgrund der Verschiebungsregel für die Varianz ist

$$(4.9.1 - 12) \quad \begin{aligned} \text{Var}(X_i) &= E(X_i^2) - E(X_i)^2 = \\ &= 1^2 \cdot p + (-1)^2 \cdot q - (2p - 1)^2 = \\ &= 4p(1 - p) \end{aligned}$$

Somit ergibt sich

$$(4.9.1 - 13) \quad \text{Var}(\hat{X}_N) = 4 N p (1 - p)$$

Speziell für $p = q = \frac{1}{2}$, den Fall des Mittelwertes, gilt

$$(4.9.1 - 14) \quad E(X_N) = 0, \quad V(X_N) = N$$

Einige durch eine Normalverteilung approximierte Binomialverteilungen zeigt Abb. 4.9.1 - 1:

Kumulierter Fehler
[Fehlereinheit]

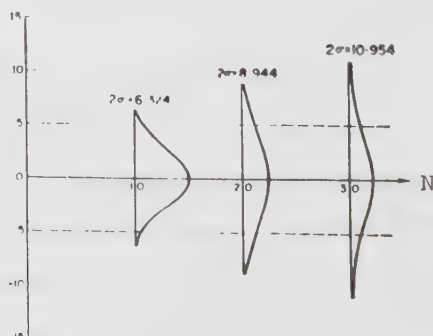


Abb. 4.9.1 - 1: Fehlerverteilungen¹⁾

1) Die Zeichnung ist New, a.a.O., S. 286, entnommen.

Daraus ist abzulesen, daß schon für 20 Anforderungen dieses Ein-Maschinen-Systems in fast 20 % aller Fälle ein Fehler von fünf Einheiten auftritt. Je mehr Anforderungen abgearbeitet werden, desto größer wird der kumulierte Fehler $\hat{x}_N$. Tendenziell die gleichen Ergebnisse stellen sich natürlich für komplexere Systeme ein. Als Konsequenz aus diesen Überlegungen läßt sich ableiten, daß die Einbeziehung stochastischer Elemente in einen Reihenfolge- und Terminierungsalgorithmus in der einen oder anderen Art notwendig ist, will man nicht einen zu großen unkontrollierten Optimalitätsverlust in Kauf nehmen. Als wichtigstes Ergebnis ist festzuhalten, daß ein unkontrollierbarer, kumulierter Fehler insgesamt entweder beträchtlich über oder unter dem deterministischen Planwert liegen kann.

Man könnte nun angesichts der Abb. 4.9.1 - 1 einwenden, daß zwar ein "Ausgleich" der Fehler innerhalb des gegebenen Planungshorizontes (ein Tag) nicht gegeben ist, aber dieser "Ausgleich" über viele Planungsperioden hinweg eintritt. In der Tat ist dies für das Ersatzkriterium "Zeit" in der Zielfunktion richtig. Es darf aber nicht vergessen werden, daß verminderte Kapazitätsauslastung (Unterschreitung) bzw. verlängerte Verweilzeit (Überschreitung) monetär zu bewerten sind, d.h. in die jeweiligen Kosten für eine Leistung eingehen. Daraus folgt, daß über viele Planungsperioden hinweg zwar ein "zeitlicher Ausgleich", aber kein "monetärer Ausgleich" stattfindet.

4.9.2 Deterministische Äquivalente

Die einfachste Methode die Verteilungen der Tätigkeitsdauern zu berücksichtigen ist die Verwendung eines deterministischen Äquivalents, allerdings nicht in Form eines Mittelwertes. Dazu muß eine Sicherheitswahrscheinlichkeit $P_s (T_i \leq t_i)$ festgelegt werden, die angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Realisation t_i der Zufallsvariablen T_i nicht überschritten wird. Unter der Voraussetzung einer logarithmischen Normalverteilung¹⁾ ergibt sich t_i zu

1) Siehe dazu Abschnitt 2.3.2.

$$(4.9.2 - 1) \quad t_i = e^{\sigma u + \ln f}$$

u = Realisation einer $(0,1)$ -normalverteilten Variablen

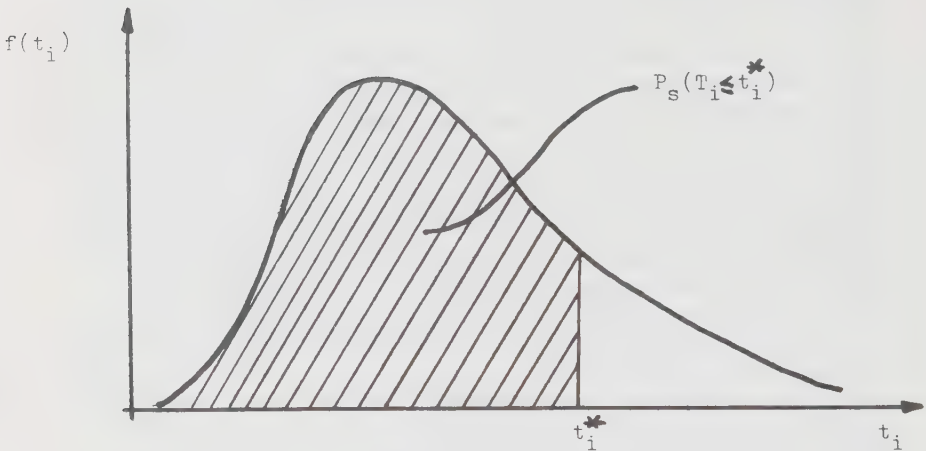


Abb. 4.9.2 - 1: Deterministisches Äquivalent

Abb. 4.9.2 - 1 zeigt die Dichte einer logarithmischen Normalverteilung. Die schraffierte Fläche stellt die Wahrscheinlichkeit P_S dar. Das Argument der Dichtefunktion für den Funktionswert P_S ist das P_S % Fraktil $t_i^{*,1)}$ Damit läßt sich einfach ein deterministisches Äquivalent für eine Zufallsvariable angeben, wenn nur

- die Verteilungsfunktion vollständig bekannt ist,
- eine Sicherheitswahrscheinlichkeit P_S angegeben werden kann.

Die erste Bedingung läßt sich nach den Ausführungen von Abschnitt 2 erfüllen. Die zweite Bedingung ist problematischer. Der jeweilige Anwender muß die geforderte Sicherheitswahrscheinlichkeit jeweils selbst bestimmen und sich über ihre Auswirkungen klar werden.²⁾ Eine hohe Sicherheitswahrschein-

- 1) Diese Vorgehensweise ist ähnlich der beim Chance-Constrained-Verfahren der linearen Programmierung verwendeten (vgl. etwa Meyer, Hansen, Rohde (1973), S. 58). Es werden hierbei Elemente im Begrenzungsvektor des Restriktionsteils als Zufallsvariable betrachtet.
- 2) Auch bei anderen Problemen im Krankenhaus, z.B. der Festlegung der Abweisungswahrscheinlichkeit für die Bestimmung von Notfallbetten ist eine Entscheidung des Anwenders nötig. Dazu siehe Meyer, Schläger (1974), S. 127.

lichkeit, z.B. 95 %, führt zur Erhöhung der Leerzeit der Leistungsstellen und damit zu einer verminderten Kapazitätsauslastung, da eben in 95 % aller Fälle die Planzeit t_i höchstens erreicht wird. Andererseits wird damit die Wartezeit der Patienten heruntergesetzt.

Wählt man eine niedrige Sicherheitswahrscheinlichkeit, so steigen Wartezeit und Durchlaufzeit an, aber die Kapazitätsauslastung der Leistungsstellen steigt ebenfalls an.

Es muß aufgrund der jeweiligen Situation des einzelnen Krankenhauses entschieden werden, welcher Sicherheitswahrscheinlichkeit der Vorzug zu geben ist.

Es ist zwar nicht zu übersehen, daß man mit dieser Vorgehensweise einige Ungenauigkeiten in Kauf nimmt, andererseits ist es gerade die Einfachheit der eben geschilderten Zusammenhänge, die das Verfahren anwendungsfreundlich macht.¹⁾

Vorteilhaft ist auch, daß je nach der speziellen Situation unterschiedliche Sicherheitswahrscheinlichkeiten für die einzelnen Leistungsstellen festgelegt werden können. Ist beispielsweise eine Leistungsstelle zu gering ausgelastet, wird man hier die Sicherheitswahrscheinlichkeit senken.

Diese Abänderungen können ohne Probleme, sofern dies der Anwender wünscht, täglich vorgenommen werden.

Mit den im vorherigen Abschnitt abgeleiteten Beziehungen für die Fehlerverteilungen von $N \times 1$ Reihenfolgeproblemen soll nun anhand eines Beispiels die Wirkung einer P_s % Sicherheitswahrscheinlichkeit dargestellt werden.

Entscheidet man sich bei allen Tätigkeitsdauern für eine Sicherheitswahrscheinlichkeit von $P_s = 0.8$, so bedeutet dies,

1) Diese Verfahren wurden auch in dem für das Stadt- und Kreiskrankenhaus Kulmbach entwickelten Reihenfolge- und Terminierungsalgorithmus verwendet (Lutz (1976), S. 10).

daß die Wahrscheinlichkeit für ein Überschreiten dieser Planzeit 0.2 ist, ein Unterschreiten aber 0.8 beträgt. Mit (4.9.1 - 10) und (4.9.1 - 13) errechnen sich Erwartungswert und Standardabweichung der Normalverteilung des kumulierten Fehlers zu

$$\begin{aligned} E(\hat{X}_N) &= -12 [E] \\ \sigma &= 3.577 [E] \end{aligned}$$

wenn man 20 Anforderungen abarbeitet.

Die entsprechende Verteilung zeigt Abb. 4.9.2 - 2

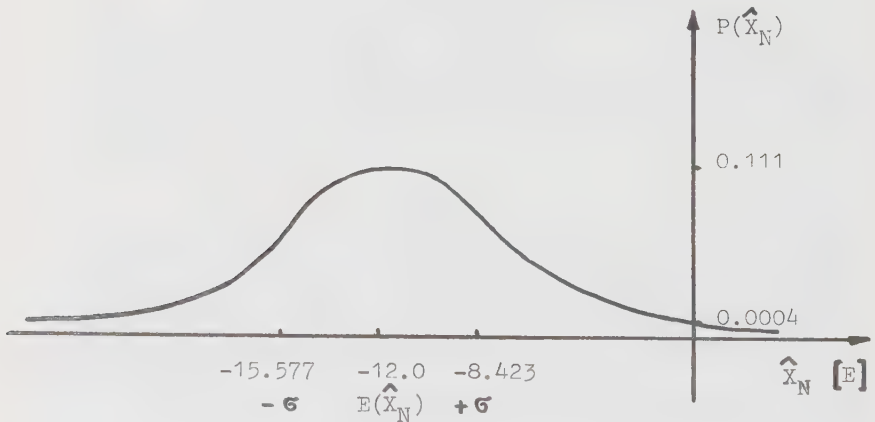


Abb. 4.9.2 - 2: Fehlerverteilung für $P_g = 0.8$

Die Wahrscheinlichkeit für einen positiven kumulierten Fehler ist dann 0.0013. Dies bedeutet, daß man praktisch keine Überschreitung zu befürchten hat. Anders ausgedrückt heißt dies, daß die Summe der Verweildauern der Patienten in den Leistungsstellen die Planzeit kaum überschreiten, vorkommt. Andererseits nimmt man dafür selbstverständlich Leerzeiten der Geräte in Kauf.

4.9.3 Stochastische Netzplanverfahren mit deterministischer Vorgangsfolge und stochastischen Tätigkeitsdauern¹⁾

Es sind verschiedene Verfahren zur exakten Berechnung von Zielfunktionen von Netzplänen mit stochastischen Tätigkeitsdauern, die einer stetigen Verteilungsfunktion gehorchen, entwickelt worden. Hierbei wurde als Zielfunktion ausschließlich der früheste Endzeitpunkt der im Netzplan dargestellten Tätigkeiten gewählt.²⁾ Die Tätigkeiten sind voneinander stochastisch unabhängig.

Eine Verteilungsfunktion für den frühesten Endzeitpunkt beliebiger Verteilungen von Tätigkeitsdauern ist zwar formal angebbar, jedoch praktisch nur für kleinere Beispiele ermittelt worden.³⁾ Für größere Netze stellen sich bei der numerischen Auswertung sowohl beträchtliche Fehler⁴⁾ als auch bedingt durch numerische Integrationen unvertretbar lange Rechenzeiten⁵⁾ ein.

Für eine spezielle Klasse von Verteilungen, die Normalverteilungen, gibt Clark⁶⁾ relativ einfache Formeln zur Bestimmung von Erwartungswert und Varianz der Verteilung des frühesten Endzeitpunktes an. Diese Beziehungen sind allerdings nicht auf andere Verteilungen übertragbar. Weit verbreitet ist die Verwendung von PERT, das sich auf Schätzungen von minimaler und maximaler Tätigkeitsdauer, sowie die "wahrscheinlichste" Tätigkeitsdauer einerseits und die Annahme einer Beta-Verteilung der Tätigkeitsdauern andererseits stützt.⁷⁾ Die resultierende Verteilung des frühesten Endzeitpunktes wird als normalverteilt vorausgesetzt.⁸⁾

-
- 1) Unter stochastischen Netzplanverfahren werden in der Literatur auch oft solche mit stochastischen Vorgangsfolgen z.B. GERT verstanden. Daher wird zur Unterscheidung dieser Begriff durch die Überschrift näher spezifiziert (siehe dazu auch Küpper u.a. (1975), S. 298).
 - 2) Vgl. etwa Küpper u.a., a.a.O., S. 131 ff.
 - 3) Siehe Kaerkes (1976), S. 205 ff.
 - 4) Ebenda, S. 201.
 - 5) Ebenda, S. 203.
 - 6) Clark (1961).
 - 7) Meyer, Hansen, Rohde (1973), S. 120 ff.
 - 8) Eine Beschreibung des PERT-Verfahrens ist bei Meyer, Hansen, Rohde (1973), S. 171 ff zu finden.

Für das vorliegende Problem ist das PERT-Verfahren jedoch aus zwei Gründen wenig geeignet:

Es sind zum einen Zielfunktionen mit mehr als einem Zielkriterium zu betrachten, zum anderen sind gegen das Verfahren eine Reihe schwerwiegender Einwände bezüglich seiner Genauigkeit erhoben worden¹⁾, die es dann angeraten erscheinen lassen, ein einfacheres Näherungsverfahren zu wählen. Insbesondere ist nachgewiesen worden²⁾, daß der Fehler bei der Berechnung der Varianz der Verteilungsfunktion des frühesten Endtermines über alle Grenzen wachsen kann.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verwendung von diskreten Verteilungen für die Tätigkeitsdauern.

Dem steht entgegen, daß, wie oben erwähnt, viele Verteilungen nur geschätzt werden können, mithin approximierte, stetige Verteilungen vorliegen, die wieder diskretisiert werden müssen.

Darüber hinaus sind bei der rechentechnischen Realisierung bald Zeit- und Speichergrenzen erreicht.³⁾

Diskrete Verteilungsfunktionen, die durch die Befragung von mehreren Fachleuten bezüglich minimaler, "wahrscheinlichster", maximaler Tätigkeitsdauern gewonnen werden können, sind wenig repräsentativ und der entstehende Fehler ist beträchtlich.

4.10 Auswirkungen von Notfällen auf die Leistungsstellen

4.10.1 Notfallankünfte

Wie schon in Abschnitt 4.2 beschrieben, beeinflussen auch die Notfälle, die über den Tag hinweg im Krankenhaus eintreffen, den Ablauf der einzelnen Leistungsstellen, da sie diese unter Umständen mit höchster Priorität in Anspruch nehmen. Für die simultane Reihenfolge- und Terminierungsplanung gilt dies ebenso.

1) Vgl. etwa Küpper, u.a. (1971), S. 169.

2) Kaerkes (1976), S. 201.

3) Siehe dazu Seeling, Spelde (1976), S. 223.

Es ist somit zu klären,

- welches Ankunftsverhalten die Notfälle aufweisen,
- ob die Notfälle in der Terminplanung zu berücksichtigen sind und
- welche zeitlichen Puffer eventuell vorzusehen sind.

Dazu ist als erstes eine Untersuchung des für jedes Krankenhaus unterschiedlichen Notfallankunftsprozesses vorzunehmen. Einige Untersuchungen für verschiedene Krankenhäuser existieren schon.¹⁾ Die Ergebnisse, die sich am Stadt- und Kreiskrankenhaus Kulmbach einstellten, sollen hier dargestellt werden. An diesem Krankenhaus ließ sich, getrennt für die sieben Wochentage, jeweils ein Poisson-Prozeß feststellen.²⁾ Die Dichtefunktion der Poissonverteilung lautet:

$$(4.10.1 - 1) \quad f(n) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Dabei ist t ein Zeitintervall und n sind die Zahl der Notfälle, die innerhalb dieses Intervalls eintreffen.

λ stellt die Ankunftsrate der Notfallankünfte dar.

Die Beziehung (4.10.1 - 1) bedeutet, daß die Zeiten zwischen zwei Notfallankünften negativ exponential verteilt sind. Die Notfallzwischenankunfts-Verteilungsfunktionen

$$(4.10.1 - 2) \quad F_{w_i}(t) = 1 - \exp(-\lambda_{w_i} t)$$

wobei gilt $w_i \in W$ und $W = \{\text{Montag, Dienstag, ..., Freitag}\}$, sind in Abb. 4.10.1 - 1³⁾ zu sehen.

Verteilungen für das Wochenende wurden fortgelassen, da an Samstagen und Sonntagen kein Routinebetrieb herrscht, diese Tage also für die Planung nicht berücksichtigt zu werden brauchen.

1) Vgl. etwa Kohlschreiber (1975), Schreiber (1975).

2) Schreiber (1975), S. 21 ff.

3) Diese und die folgenden Abbildungen sind Schreiber (Schreiber (1975)) entnommen.

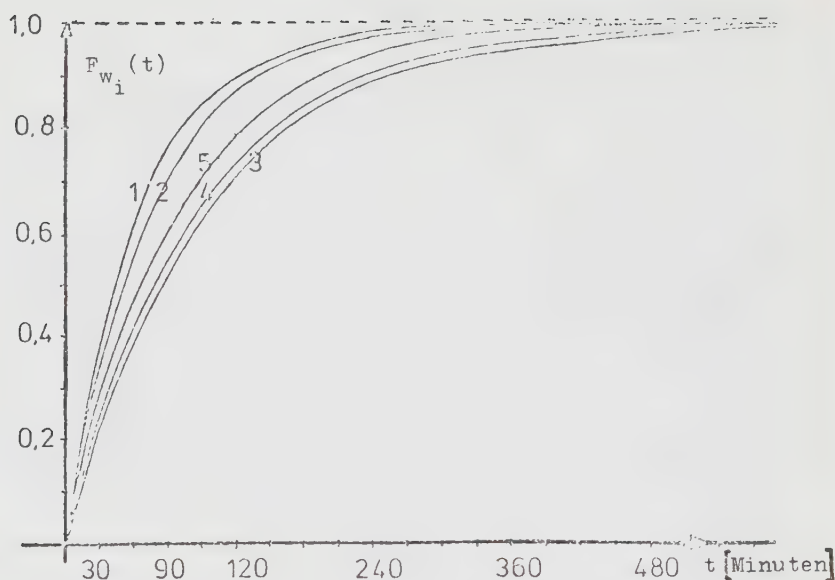


Abb. 4.10.1 - 1: Notfallzwischenankunftszeit-Verteilungen

Für die mittleren Zwischenankunftszeiten $T_{w_i} = \frac{1}{\lambda_{w_i}}$ ergeben sich die Werte

1. Montag	$T_1 = 65.38$ [Minuten]
2. Dienstag	$T_2 = 73.22$ "
3. Mittwoch	$T_3 = 124.1$ "
4. Donnerstag	$T_4 = 114.8$ "
5. Freitag	$T_5 = 67.5$ "

4.10.2 Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten bestimmter Notfälle

Die Notfälle sind von recht unterschiedlichem Grad der Schwere und betreffen sämtliche Körperteile. Dementsprechend sind auch die diagnostischen Maßnahmen zur Abklärung des Befundes verschieden, d.h. die Leistungsstellen werden je nach Notfallart beansprucht. Dies bedeutet, daß zuerst empirisch ermittelt werden muß, welche Notfallarten an den Wochentagen

mit welchen Wahrscheinlichkeiten zu verzeichnen sind.

Dazu ist es sinnvoll, die große Zahl der verschiedenen Notfallarten nach einem Diagnoseschlüssel in Gruppen zusammenzufassen. Für das Krankenhaus Kulmbach wurde der ICD-Schlüssel gewählt und eine Einteilung in fünfzehn Diagnosegruppen vorgenommen.¹⁾ Diesen Gruppen d_j wurde dann für jeden Wochentag w_i eine Wahrscheinlichkeit für ihr Auftreten zugeordnet.

Diese bedingte Wahrscheinlichkeit soll mit $p (d_j | w_i)$ bezeichnet werden. Dabei gilt

$$(4.10.2 - 1) \quad 0 \leq p (d_j | w_i) \leq 1 \quad \begin{array}{l} i = (1, \dots, 5) \\ j = (1, \dots, 15) \end{array}$$

$$w_i \in W, \quad d_j \in D \quad D = \text{Diagnosegruppen}$$

Ferner gilt

$$(4.10.2 - 2) \quad \sum_j p (d_j | w_i) = 1$$

Man erhält damit eine Wahrscheinlichkeitsmatrix P_w

Nr.	Mo	Di	Mi	Do	Fr
(1)	0.154	0.130	0.164	0.132	0.144
(2)	0.037	0.013	0.026	0.024	0.026
(3)	0.009	0.030	0.019	0.014	0.016
(4)	0.027	0.013	0.026	0.035	0.035
(5)	0.058	0.104	0.061	0.052	0.090
(6)	0.108	0.027	0.001	0.066	0.051
(7)	0.049	0.067	0.076	0.063	0.035
(8)	0.034	0.026	0.034	0.052	0.038
(9)	0.119	0.124	0.117	0.102	0.112
(10)	0.098	0.116	0.140	0.122	0.132
(11)	0.047	0.053	0.056	0.049	0.045
(12)	0.208	0.244	0.178	0.234	0.215
(13)	0.012	0.003	0.019	0.017	0.019
(14)	0.015	0.023	0.007	0.014	0.016
(15)	0.025	0.027	0.016	0.024	0.026

Tab. 4.10.2 - 1: Wahrscheinlichkeitsmatrix P_w

1) Schreiber (1975), S. 32. Die Einteilung zeigt Tab. 4.10.2 - 2.

Die Matrix P_w setzt sich aus den Vektoren¹⁾ $P_{w_1}, P_{w_2}, \dots, P_{w_5}$ zusammen, die jeweils die diskreten Diagnosegruppenverteilungen eines Tages darstellen.

Nr.	Schlüssel-Nr.	Bezeichnung
(1)	520 - 577	Krankheiten der Verdauungsorgane
(2)	580 - 678	Krankheiten der Harn- und Geschlechtsorgane und Komplikationen in der Schwangerschaft, bei Entbindung und im Wochenbett
(3)	680 - 737	Krankheiten der Haut und des Unterzellgewebes, des Skeletts, der Muskeln und des Bindegewebes
(4)	N800 - 809	Brüche des Schädels, der Wirbelsäule und des Rumpfskeletts
(5)	N810 - 819	Knochenbrüche der oberen Gliedmaßen
(6)	N820 - 829	Knochenbrüche der unteren Gliedmaßen
(7)	N830 - 848	Verrenkungen, Verstauchungen, Gelenk- und Muskelzerrungen
(8)	N850 - 854	Intrakranielle Verletzungen
(9)	N870 - 879	Zerreißen und offene Wunden des Kopfes, des Halses und des Rumpfes
(10)	N880 - 887	Zerreißen und offene Wunden der oberen Gliedmaßen
(11)	N890 - 897	Zerreißen und offene Wunden der unteren Gliedmaßen
(12)	N920 - 929	Prellungen und Quetschungen
(13)	N940 - 949	Verbrennungen
(14)		Sonstige Erkrankungen und Verletzungen
(15)		Blutabnahmen bei Alkoholverdacht nach StVO

Tab. 4.10.2 - 2: Diagnosegruppen nach der Internationalen Klassifikation der Krankheiten, Verletzungen und Todesursachen (ICD) - 1968⁻²⁾

1) Unter Vektoren seien Spaltenvektoren verstanden.

2) Vgl. Statistisches Bundesamt (1968).

4.10.3 Wahrscheinlichkeiten für die Inanspruchnahme von Leistungsstellen aufgrund bestimmter Notfallarten

Nun muß in einem weiteren Schritt ermittelt werden, mit welchen Wahrscheinlichkeiten die verschiedenen Diagnosearten die untersuchten Leistungsstellen beanspruchen, das klinisch-chemische Labor, die Operationssäle, die Röntgenabteilung und die Stationen. Diese bedingte Wahrscheinlichkeit sei mit $p(l_k | d_j)$ bezeichnet. Dabei ist l_k eine Leistungsstelle.

Es gilt

$$(4.10.3 - 1) \quad 0 \leq p(l_k | d_j) \leq 1 \quad \begin{array}{l} j = (1, \dots, 15) \\ k = (1, \dots, 4) \end{array}$$

Weiter muß gelten

$$(4.10.3 - 2) \quad p(l_k | d_j) = 1 - p(\bar{l}_k | d_j)$$

Das bedeutet, daß die Wahrscheinlichkeit, daß ein Notfall mit einer Diagnose der Gruppe j nicht die Leistungsstelle l_k beansprucht, die Gegenwahrscheinlichkeit zu (4.10.3 - 1) darstellt. Man erhält wiederum für alle k Leistungsstellen eine Wahrscheinlichkeitsmatrix $P_L = \begin{matrix} & P_{l_1} & P_{l_2} & P_{l_3} & P_{l_4} \end{matrix}$, die in Tab. 4.10.3 - 1 dargestellt ist.

Leistungsst.	Röntgen	KCL	OP	Station
Diagnosen				
(1)	0.125	0.725	0.367	1.000
(2)	0.100	0.020	0.000	0.940
(3)	0.440	0.000	0.000	0.800
(4)	1.000	0.100	0.000	0.840
(5)	1.000	0.000	0.320	0.660
(6)	1.000	0.000	0.100	0.900
(7)	0.950	0.000	0.090	0.180
(8)	0.850	0.012	0.000	0.975
(9)	0.670	0.005	0.000	0.280
(10)	0.525	0.000	0.000	0.190
(11)	0.589	0.000	0.000	0.295
(12)	0.960	0.003	0.000	0.240
(13)	0.000	0.000	0.000	0.400
(14)	0.100	0.000	0.000	0.400
(15)	0.000	0.000	0.000	0.000

Tab. 4.10.3 - 1: Wahrscheinlichkeitsmatrix P_L

Es ist zu beachten, daß die Zeilensummen in P_L nicht genau 1 sein müssen, da die Beanspruchungen der einzelnen Leistungsstellen jeweils unabhängige Ereignisse sind!

4.10.4 Beanspruchung von Leistungsstellen durch Notfälle

Nun ergibt sich die Wahrscheinlichkeit $p_i (l_k, d_j | w_i)$, daß ein Notfall der Diagnosegruppe d_j an einem Wochentag w_i auftritt und eine Leistungsstelle l_k beansprucht wegen der Unabhängigkeit der Ereignisse zu

$$(4.10.4 - 1) \quad P (l_k, d_j | w_i) = p (l_k | d_j) p (d_j | w_i) \quad \forall i, j, k$$

wobei wieder gilt

$$(4.10.4 - 2) \quad 0 \leq p (l_k, d_j | w_i) \leq 1 \quad \forall i, j, k$$

Auch hier lassen sich die entstandenen Wahrscheinlichkeiten in Matrixform darstellen. Dabei ergibt sich für jedes w_i eine "Wochentags"-Matrix.

Da der Ankunftsprozeß nicht bezüglich der Diagnosearten spezifiziert wurde, ist auch nicht von Interesse, welche Diagnoseart eine Leistungsstelle beansprucht, sondern nur die Belastung durch sämtliche in Frage kommenden Notfälle. D.h. es muß die Wahrscheinlichkeit für eine Beanspruchung einer Leistungsstelle durch einen beliebigen Notfall errechnet werden.

Diese ergibt sich mittels des Satzes von der totalen Wahrscheinlichkeit:

$$(4.10.4 - 3) \quad p(l_k | w_i) = \sum_j p(l_k | d_j) \cdot p(d_j | w_i) \quad \forall i, k$$

Die Ergebnisse dieser Operation sind in Tab. 4.10.4 - 1 zu finden.

Leistungsst.	Röntgen	KCL	OP	Station
Wochentage				
Montag	0.6498	0.1167	0.0903	0.5610
Dienstag	0.6723	0.0975	0.0897	0.4565
Mittwoch	0.6351	0.1235	0.0926	0.7995
Donnerstag	0.6695	0.1016	0.0773	0.4905
Freitag	0.6480	0.1101	0.0899	0.5000
Samstag	0.672	0.058	0.068	0.472
Sonntag	0.585	0.071	0.071	0.478

Tab. 4.10.4 - 1: Matrix der Wahrscheinlichkeiten $p(l_k | w_i)$

Diese Wahrscheinlichkeitsmatrix läßt sich anschaulich in einer dreidimensionalen Abbildung¹⁾ darstellen.

1) Abb. 4.10.4 - 1 stellt jedoch keine zweidimensionale Wahrscheinlichkeitsverteilung dar, sondern eine Anordnung von Punktwahrscheinlichkeiten.

Wahrscheinlichkeiten

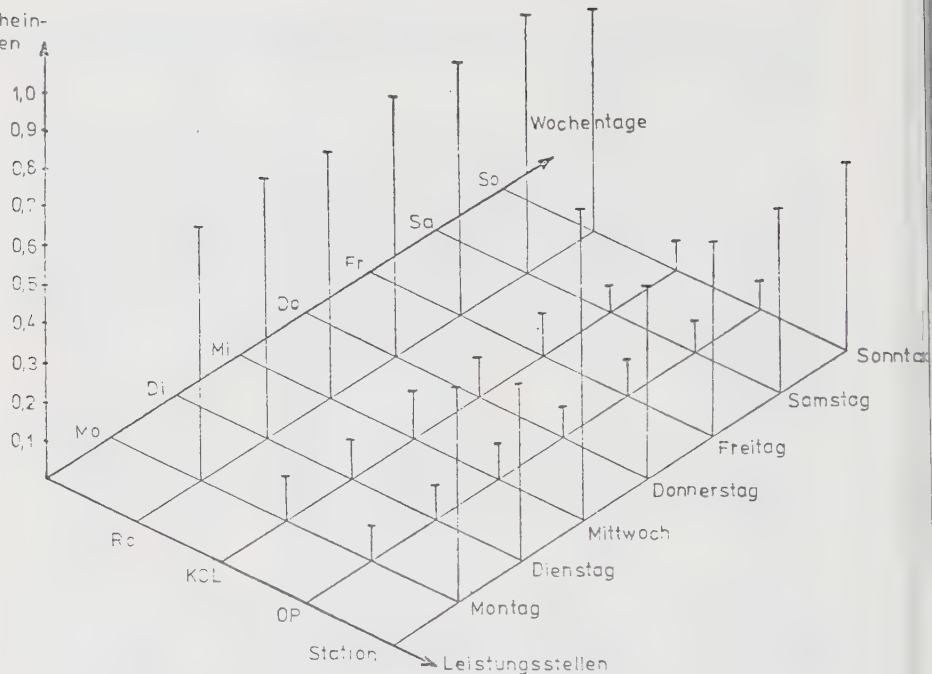


Abb. 4.10.4 - 1: Stabdiagramm der Wahrscheinlichkeiten $p(l_k | w_i)$

Durch die Wahrscheinlichkeiten von Tab. 4.10.4 - 1 werden die ankommenden Notfälle sozusagen auf die Leistungsstellen verteilt.

4.10.5 Berücksichtigung von Notfällen in der Terminplanung

Für die Berücksichtigung der Notfälle ist nun die Ermittlung ihrer absoluten Anzahl innerhalb eines Zeitintervalls notwendig.

Dazu muß zuerst die Umkehrfunktion der Poisson-Verteilung $F(NF) = P_{NF}$ gebildet werden, da ja nun nicht die Wahrscheinlichkeiten P_{NF} interessieren, sondern der Wert des Argumentes NF , d.h. die Anzahl der Notfälle zu bestimmen ist.

Da dies analytisch nicht möglich ist, kann ein numerisches

Näherungsverfahren¹⁾ benutzt werden, um bei vorgegebener Wahrscheinlichkeit $p_{NF}(X \leq NF)$ den entsprechenden Wert $NF = 0, 1, 2, \dots$ d.h. Zahl der Notfälle zu ermitteln.

Die Verteilungsfunktion der Poisson-Verteilung lautet

$$(4.10.5 - 1) \quad F(NF) = \sum_{NF} \frac{(\lambda t)^{NF}}{NF!} e^{-\lambda t} = p_{NF}$$

Die Umkehrfunktion ist dann $F^{-1}(p_{NF})$. Sie besagt, daß mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit p_{NF} im Zeitraum t höchstens n Notfälle eintreffen. Dabei stellt NF das p_{NF} -Fraktil der Poisson-Verteilung dar.

Beispielsweise ergibt sich für $p_{NF} = 0.9589$, daß während eines 1440 Minuten-Intervalles mit höchstens 11.78 Patienten zurechnen ist.

Man kann nun für vorgegebene p_{NF} und t die entsprechenden Werte festlegen.

Es gilt auch hier, daß eine "optimale" Wertekombination von p und t nicht anzugeben ist, da diese Parameter aufgrund der speziellen Situation eines Krankenhauses bestimmt werden müssen.

Wählt man ein großes p_{NF} so wird zwar sichergestellt, daß ein entsprechend großer Teil der Notfallpatienten in der Terminplanung berücksichtigt wird, allerdings werden damit auch Leerzeiten der Geräte in Kauf genommen, da das oben beschriebene Vorgehen auf den ungünstigsten Fall abstellt.

Andererseits bedeutet ein zu kleines p_{NF} zusätzliche Wartezeiten für die eingeplanten Nicht-Notfallpatienten. Ebenso ist bei der Festlegung des Intervalles zu berücksichtigen, daß bei zu kleinen Intervallen unter Umständen unnötig viele Notfälle berücksichtigt werden. Man wird also den Arbeitstag derart in (möglicherweise unterschiedlich) lange Intervalle unterteilen, wie dies nach Analyse der Daten angebracht ist.

Bevor jedoch etwaige Pufferzeiten für Notfälle in den Ter-

1) Schreiber (1975), S. 35.

minplan eingebaut werden, muß aufgrund der vorliegenden Datenanalyse die grundsätzliche Entscheidung getroffen werden, ob eine Berücksichtigung der Notfälle überhaupt notwendig ist.

Beispielsweise stellt sich im Falle des Kulmbacher Krankenhauses heraus, daß nur für die Röntgenabteilung Notfälle eingeplant werden sollten.¹⁾

Die Einplanung von Notfällen kann nun folgendermaßen geschehen: Man legt eine Verteilung oder ein deterministisches Äquivalent für einen Notfall fest und fügt diese zusätzliche Tätigkeit bzw. Tätigkeiten in der entsprechenden Leistungsstelle am einfachsten nachträglich in den Reihenfolge- und Terminplan ein. Dabei muß berücksichtigt werden, daß dies innerhalb der zugehörigen Intervallgrenzen $[t, t+\tau]$ geschieht, wenn τ das betrachtete Intervall ist.

Abb. 4.10.5 - 1 zeigt einen Teilgraph ohne Notfall.

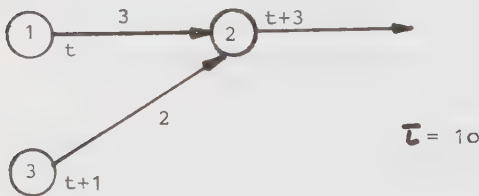


Abb. 4.10.5 - 1: Teilgraph ohne Notfall

Die Tätigkeiten zwei und drei werden in derselben Leistungsstelle ausgeführt. Für diese Leistungsstelle soll in Intervall $[t, t+\tau]$ ein Notfall eingeplant werden. Dabei ist $\tau = 10$ [Minuten]

Abb. 4.10.5 - 2 stellt den Teilgraph mit eingeplantem Notfall dar, dessen Tätigkeitsdauer 4 [Minuten] beträgt.

1) Schreiber (1975), S. 42.

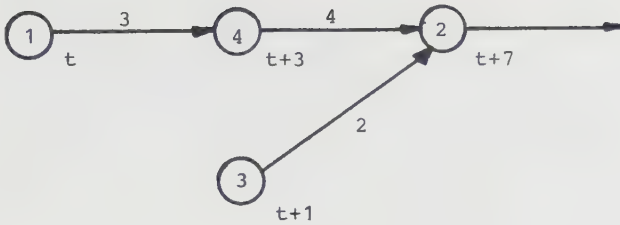


Abb. 4.10.5 - 2: Teilgraph mit eingeplantem Notfall

Selbstverständlich verschieben sich sämtliche Beginnzeitpunkte. Die Zielfunktion verändert sich ebenfalls.

Analog geht man für sämtliche Leistungsstellen und Zeitintervalle der Arbeitszeit vor.

4.11 Bedienungszeitrestriktionen

Als weitere Verfeinerung des Reihenfolge- und Terminierungsalgorithmus werden nun auch noch Restriktionen der Bedienungszeit eingeführt. Es ist klar, daß derartige Restriktionen nicht für alle Bedienungsstationen und Leistungen Gültigkeit haben können. So kann es z.B. für Bettenstationen keine derartigen zeitlichen Bedienungsrestriktionen geben. Das gleiche gilt für Notfälle aller Art.

Andererseits werden manche Leistungsstellen erst von einem bestimmten Zeitpunkt an betrieben, da dies aus Gründen des Arbeitsablaufs im gesamten Krankenhaus angebracht erscheint.

Die Berücksichtigung eines bestimmten Bedienungsanfangszeitpunktes bereitet keine Schwierigkeiten. Statt des künstlichen, gemeinsamen Nullpunktes für die Leistungen aller Bedienungsstationen werden die Anfangszeitpunkte t_{x_i} der Leistungen, die in Bedienungsstationen mit beliebig später liegenden Beginnzeitpunkten erbracht werden, mit dem entsprechenden Wert $t_{x_i}^B$ vorbesetzt. Diese Leistungen werden dann mit dem Algorithmus, wie beschrieben, an passender Stelle eingeplant. Will man darüber hinaus auch den Endzeitpunkt der Annahme von Leistungen festlegen, kann man eine Schranke SE einbauen, die

den Beginn einer jeden Leistung t_{x_i} in einer Bedienstationsstation höchstens noch bis zu diesem Zeitpunkt zuläßt.

Ähnlich kann man bei der Berücksichtigung von Zeitintervallen, z.B. Visite, Essen, verfahren, in denen der Patient in der Bettenstation anwesend sein muß, und die deswegen bei der Terminierung ausgespart werden müssen.

4.12 Allgemeine Zielfunktionen

Bisher wurde für die Beschreibung des Modells der Simultanplanung von Leistungsstellen der früheste Zeitpunkt des Beginns der letzten Leistung an einem Tag als Zielfunktion verwendet.

Da im Krankenhaus aber nicht nur die Verweilzeit der Patienten in den Leistungsstellen relevant ist, sondern ebenso die Auslastung der Leistungsstellenkapazitäten und die medizinisch-technischen Tätigkeitsfolgen zur Erbringung bestimmter Leistungsfolgen von Bedeutung sind, ist es angebracht, eine allgemeine Zielfunktion zu definieren.¹⁾

Dazu sind zu berücksichtigen:

- Leerzeiten der Geräte bzw. Leistungsstellen
- Durchlaufzeiten der Patienten bzw. Anforderungen.

Die Leerzeiten der Geräte entstehen dadurch, daß Patienten ablaufbedingt nicht zur Verfügung stehen, wenn eine Leistung beendet wurde.

Die Leerzeiten²⁾ eines Gerätes m sollen mit t_{lm} bezeichnet werden. Die Durchlaufzeit t_{di} eines Patienten i setzt sich aus dessen Wartezeiten t_{wim} und Untersuchungszeiten t_{bim} auf den Geräten m ($m = 1, 2, \dots, M$) zusammen. Außerdem ist noch die Umrüstzeit t_{rim} zu berücksichtigen, die beim Umrüsten des Gerätes m zur Untersuchung eines Patienten i notwendig werden. Darunter sind ausschließlich ablaufbedingte Umrüstzeiten zu verstehen, die nur dann auftreten, wenn vor Patient i ein Patient untersucht wurde, für den ein anderer Gerätestatus

1) Vgl. auch Mensch (1968), S. 42.

2) Die Leerzeiten entsprechen in der Netzplantechnik den freien Puffern von Ereignisgraphen.

erforderlich war. Die reinen Rüstzeiten sollen in den Bearbeitungszeiten enthalten sein.¹⁾

Damit kann folgende Zielfunktion angeschrieben werden:

$$(4.12 - 1) \quad ZF = \sum_m^M p_{lm} t_{lm} + \sum_i^I p_{di} t_{di} + \sum_m^M \sum_i^I p_{rim} t_{rim} \rightarrow \min$$

Hierbei sind mit p_{lm} die Zeiteinheitenkosten der Leerzeiten des Gerätes m , p_{di} die Zeiteinheitenkosten der Durchlaufzeit des Patienten i und p_{rim} die Umrüstkosten am Gerät m für Patient i bezeichnet.

Eine derartige allgemeine Zielfunktion kann jedoch nicht im oben beschriebenen Verfahren verwendet werden, Unterlagen über Kosten und Umrüstzeiten fehlen.

Stattdessen wird man die in der Zielfunktion vorkommenden Zeiten mit nicht-monetären Gewichtungsfaktoren g bewerten. In diesen kommt die Bedeutung der entsprechenden Zeiten für den Arbeitsablauf in den Leistungsstellen zum Ausdruck.

Für das Branch-and-Bound-Verfahren ist jedoch noch eine weitere Einschränkung zu machen.

Es sind nur solche Funktionen möglich der Wert beim Durchsuchen der Zerlegungsstruktur monoton wächst, da lediglich in diesem Falle sichergestellt ist, daß solche Zweige des Entscheidungsbaumes nicht nach der optimalen Lösung durchsucht werden, die ungünstigere Werte als die bisher beste zulässige Lösung erbringen. Die Verwendung des Kriteriums Leerzeiten hätte eine nicht-monotone Zielfunktion zur Folge. Es ist nämlich möglich, daß die Zielfunktionswerte in einem Zweig zunächst steigen aber später wieder fallen, da beispielsweise die Leerzeiten sinken.

Daher können für die Ermittlung einer optimalen Lösung nur folgende Zielfunktionen verwendet werden:

$$(4.12 - 2) \quad ZF = \sum_i^I g_{di} t_{di} \rightarrow \min!$$

1) Prämisse 2, Abschnitt 4.1.2.

Die Zielfunktion in Beziehung (4.11 - 2) ist eine Erweiterung der Zielfunktion von (4.6.2 - 1). Während dort der früheste Beginn der virtuellen Endtätigkeit gesucht war, kann jetzt auf die Einführung dieser Endtätigkeit verzichtet werden. Stattdessen werden die gewichteten Durchlaufzeiten für die einzelnen Leistungen in den Bedienstationsstationen verwendet. Interessiert man sich jedoch für die Auswirkungen einer bestimmten Patientenreihenfolge auf die gesamte Zeit der Beanspruchung der Leistungsstellen durch die Bearbeitung der Anforderungen, reduziert sich die Zielfunktion auf

$$(4.12 - 3) \quad ZF = t_E \longrightarrow \min!$$

Hierbei ist t_E der früheste Zeitpunkt zu den sämtlichen Leistungen eines Tages erbracht sind.

Da die Minimierung der Durchlaufzeiten die Leerzeiten, d.h. Kapazitätsauslastung nicht berücksichtigt, ist sie im strengen Sinne dann zulässig, wenn keine Engpässe in den Bedienstationsstationen auftreten.

Eine derartige Situation kann selbstverständlich nicht generell im Krankenhaus unterstellt werden.¹⁾

Sollen also doch Leerzeiten in der Zielfunktion berücksichtigt werden, so geschieht dies einfach auf die in Abschnitt 4.9.2 geschilderte Weise durch eine geeignete Wahl der deterministischen Äquivalente für die Verteilungen der Tätigkeitsdauern.

Das würde im Falle des Engpasses bedeuten, daß man Fraktile wählt, die mehr zum 50%-Fraktile tendieren, wodurch gewährleistet würde, daß in der entsprechenden Leistungsstelle weniger Leerzeiten auftraten, was andererseits mehr Wartezeiten und damit eine höhere Durchlaufzeit zur Folge hätte.

Da der Entscheidende jedenfalls die deterministischen Äquivalente festlegen muß, ist ihm zusammen mit der Zielfunktion von (4.12.1 - 2) ein relativ genaues und variables Werkzeug in die Hand gegeben, das jedoch immer übersichtlich bleibt.

1) Beispielsweise stellen die Bedienstationsstationen der in Abschnitt 3.2 geschilderten Röntgenabteilung einen Engpaß bezüglich des Gesamtkrankenhauses dar.

Dieser Ansatz entspricht wohl der heutigen Situation in den Krankenhäusern am ehesten, da es in erster Linie um die Verkürzung der Verweilzeiten und erst in zweiter Linie und zu einem späteren Zeitpunkt um eine verstärkte Kapazitätsauslastung geht.

Will man dennoch nicht auf die Einbeziehung von Leerzeiten verzichten, kann man sich mit einer heuristischen Lösung¹⁾ zufrieden geben.

Eine solche Zielfunktion würde lauten

$$(4.12 - 4) \quad ZF = \sum_m^M g_{lm} t_{lm} + t_E \longrightarrow \min!$$

wobei g_{lm} wieder Gewichtungsfaktoren darstellen.

Es stellt sich hier auch das Problem, in welcher Größenordnung die g_{lm} liegen sollen, da diese Entscheidung nachhaltige Auswirkungen auf den Zielfunktionswert hat. Auch hier kann keine allgemeinverbindliche Aussage getroffen werden. Allerdings muß gewährleistet sein, daß einerseits die g_{lm} nicht so groß sind, daß der Einfluß von t_E gegen Null geht und andererseits dürfen die g_{lm} nicht so klein sein, daß die Wirkung der t_{lm} verschwindet. In beiden Fällen wäre der Sinn der Zielfunktion (4.12 - 4) verfehlt.

Denkbar wäre anstelle einer gegenüber (4.12 - 1) vereinfachten Zielfunktion, die Einbeziehung weiterer Zielkriterien. Hierzu kämen beispielsweise Strafkosten für Terminüberschreitungen usw. in Betracht.

Derartige Zielfunktionen sind jedoch wegen des ungeklärten Problems der monetären Bewertung von Outputgrößen im Krankenhaus nicht sinnvoll.

1) Vgl. Abschnitt 4.6.3.

4.13. Das Rechnerprogramm

Das in den vorstehenden Abschnitten beschriebene Verfahren zur Lösung des simultanen Reihenfolge- und Terminierungsproblems für mehrere Leistungsstellen wurde durch ein Rechnerprogramm realisiert und auf der CDC 3300 der Universität Erlangen-Nürnberg in FORTRAN IV implementiert¹⁾.

Auf eine eingehende Programmbeschreibung wird hier verzichtet. Ein Übersichts-Flußdiagramm des Programmsystems zeigt Abb. 4.13 - 1.

Das Programm ist modular aufgebaut, so daß das Hauptprogramm lediglich die Steuerung der Unterprogrammblöcke übernimmt. Sämtliche Matrizen sind aus Gründen der Einfachheit in geschlossener Form während der Programmausführung im Kernspeicher. Diese Vorgehensweise hat zwar den Vorteil der größeren Rechengeschwindigkeit, begrenzt aber den Problemumfang, weil größere Dimensionen bald an Speichergrenzen stoßen. Da es hier in erster Linie um die Darstellung des Verfahrens geht, erschien dies zweckmäßig. Die Zahl der Bedienungsstationen wurde daher auf 10 beschränkt. Es können bis zu 100 verschiedene Tätigkeiten verarbeitet werden und die Zahl der Patienten ist maximal 50.

Selbstverständlich können durch eine serielle Darstellung der Matrizen weitaus größere Probleme bewältigt werden, dann allerdings auf Kosten der Rechenzeit.

Bezüglich Rechner-Algorithmen für das Transportproblem stellen Charnes u.a.²⁾ fest, daß angesichts der heutigen, schnellen³⁾ Hintergrundspeicher, also Trommel- und Plattenspeicher nahezu unbegrenzt große Probleme auf moderne Rechanlagen gebracht werden und mit vertretbarer Rechenzeit bewältigt werden können.

1) Das Programmpaket entstand unter Mitwirkung der Herren cand. inf. K. Steiner, cand. inf. W. Greul und cand. inf. N. Hoyer.

2) Charnes u.a. (1975), S. 79.

3) Der Begriff schnell bezieht sich hier auf die Zugriffsgeschwindigkeit der auf Hintergrundspeichern abgelegten Daten. Es ist eine derartige Steigerung dieser Geschwindigkeit eingetreten, daß die effektive Speicherkapazität des Kernspeichers praktisch identisch mit der Kapazität von Hintergrundspeichern und Arbeitsspeicher ist.

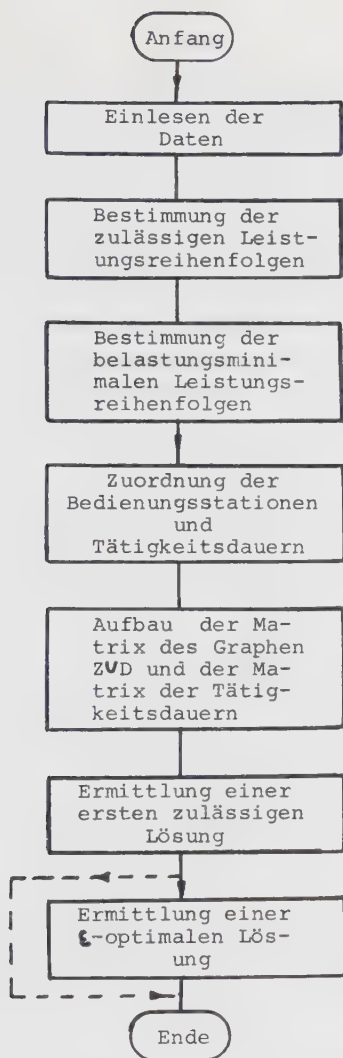


Abb. 4.13 - 1: Flußdiagramm des Rechnerprogrammes für das Reihenfolge und Terminierungsproblem

Berücksichtigt man, daß das Transportmodell ähnlich wie das vorliegende Reihenfolge- und Terminierungsproblem in Matrizenform auf dem Rechner behandelt wird, ist der Schluß zu ziehen, daß auch in den größeren, vorkommenden Krankenhäusern mit 1000 bis 2000 Betten für die Leistungsstellen des medizinischen Bereichs das vorstehende Verfahren implementiert werden kann.

Es ist anzumerken, daß die Matrix der zulässigen Leistungsreihenfolgen R und die Matrix der Belastungen B rechentechnisch in einer einzigen Matrix zusammengefaßt sind.

In Abb. 4.13 - 1 deutet ferner der gestrichelte Informationsfluß an, daß für allgemeine Zielfunktionen nur eine erste zulässige Lösung ermittelt wird und der Branch-and-Bound-Algorithmus entfällt.

4.14. Beispiele aus dem Stadt- und Kreiskrankenhaus Kulmbach

4.14.1. Datenbasis

Im folgenden soll die in Abschnitt 4 beschriebene Methode anhand von Beispielen, die auf Datenmaterial¹⁾ des Stadt- und Kreiskrankenhauses Kulmbach zurückgreifen, verdeutlicht werden.

Es werden hierzu 5 Leistungsstellen dieses Krankenhauses betrachtet. Die Zahl der ihnen zugeordneten Bedienungsstationen ist in Tab. 4.14.1 - 1 zu sehen.

<u>Leistungsstelle</u>	<u>Zahl der Bedienungsstationen</u>
Endoskopie	2
Kreislaulabor	2
Nuklearmedizin	1
Physikalische Therapie	3
Röntgenlabor	2

Tab. 4.14.1 - 1: Leistungsstellen und Bedienungsstationen

1) Die hier verwendeten Daten wurden von Herrn Ing. H. Lutz im Rahmen des Demonstrations-Datenverarbeitungs-Projekts für das Allgemeine Krankenhaus im Krankenhaus Kulmbach erhoben und dem Verfasser zur Verfügung gestellt.

Für das Verfahren zur Lösung des Reihenfolge- und Terminierungsproblems sind ferner die Art der medizinischen Tätigkeiten sowie ihre Zuordnung zu den Leistungsstellen und Bedienstungen anzugeben (Tab. 4.14.1 - 2). Es ist hierbei angenommen, daß eine eindeutige Zuordnung vorliegt. Die Tätigkeiten sind mit natürlichen Zahlen kodiert. Zu jeder Tätigkeit gehört eine Verteilungsfunktion (logarithmische Normalverteilung) mit den Parametern $\ln \xi$ ¹⁾ und σ . Diese Werte sind in der dritten und vierten Spalte von Tab. 4.14.1 - 2 zu finden. Sie basieren auf einer umfangreichen Datenerhebung im Krankenhaus Kulmbach.

Art der Leistung	Nr	$\ln \xi$	σ	Leistungsstelle	Bedienstung
Laparoskopie	1	3.135	0.2657	Endoskopie	1
Gastroskopie	2	1.995	0.4412	"	1
Duodenoskopie	3	2.397	0.4054	"	1
Koloskopie	4	3.007	0.3398	"	2
Rektoskopie	5	2.014	0.4274	"	2
Panendoskopie	6	2.397	0.4054	"	2
Leberblindpunktion	7	1.1972	0.4789	"	2
EKG	8	1.2237	0.2348	Kreislaulabor	3
Dynamisches EKG	9	13 ²⁾		"	3
EKG mit Nebenbehandlung	10	1.7047	0.5465	"	3
Telemetrisches EKG	11	21		"	3
Vasogramm	12	6		"	4
Radioisotopen-Nephrogramm	13	3.7084	0.2578	Nuklearmedizin	5
Schilddrüsen-szintigramm	14	2.3025	0.2578	"	5
Leberszintigramm	15	3.1570	0.47	"	5

Tab. 4.14.1 - 2: Liste der medizinischen Tätigkeiten

1) Als Basis der Logarithmen wird hier e gewählt.

2) Dieser und einige andere Werte sind keine Verteilungen sondern deterministische Größen.

Art der Leistung	Nr	ln f	5	Leistungsstelle	Bedienungsstation
Nierenszintigramm	16		18	Nuklearmedizin	5
Hirnszintigramm	17		57	"	5
Stangerbad	18		20	Physikalische Therapie	6
Saluminbad	19		20	"	6
Sudabad	20		50	"	6
Unterwassermassage	21		20	"	7
Bewegungsübungen	22	2.7725	0.6286	"	8
Arm röntgen	23	0.9162	0.2468	Röntgenlabor	9
Fuß röntgen	24	1.1631	0.2954	"	9
Wirbelsäule röntgen	25	1.3862	0.3541	"	9
Thorax Aufnahme	26	0.6931	0.5306	"	9
Thorax Durchleuchtung	27	0.8754	0.2876	"	10
Galle	28	0.8319	0.3908	"	10
MDP	29	2.6375	0.3857	"	10
Colon	30	2.5563	0.3944	"	10
Niere	31	3.0775	0.3298	"	9

Tab. 4.14.1 - 2: Fortsetzung

Schließlich sind noch die Matrix R der zulässigen Leistungsreihenfolgen, sowie die Matrix BL der Belastungen festzulegen. Dies geschieht aus Gründen der programmtechnischen Vereinfachung in einer einzigen Matrix (Tab. 4.14.1 - 3). Die nichtzulässigen Leistungsreihenfolgen sind mit 0 gekennzeichnet. Die zulässigen Folgen erhalten Belastungskennzahlen zwischen 1 (geringe Belastung) und 3 (sehr starke Belastung).

Die Kennzahlen sind eher "gefühlsmäßig" bei der Datenerhebung in der Diskussion mit dem Personal entstanden.

4.14.2 Beispiele

Beim Beispiel 1 handelt es sich um die Einplanung von 5 Patienten mit insgesamt 10 medizinischen Tätigkeiten, die in einer der im vorigen Abschnitt angegebenen Leistungsstellen des Krankenhauses Kulmbach ausgeführt werden.

Patient	Tätigkeiten			
1	17	1	11	o
2	17	31	2o	o
3	13	11	o	o
4	17	o	o	o
5	11	o	o	o

Tab. 4.14.2 - 1: Untersuchungsprogramm für 5 Patienten, Beispiel 1

Die Tätigkeiten sind nach Tab. 4.14.1 - 2 in ganzen Zahlen kodiert.

Das Untersuchungsprogramm wird durch Nullen bis zur programmtechnisch maximal möglichen Zahl von Tätigkeiten aufgefüllt. In einem ersten Schritt erfolgt nun die Ermittlung der zulässigen Leistungsreihenfolgen L_i . Danach wird durch die Zuteilung von Prioritätskennziffern $PK = \{0, 1, 2, 3\}$ eine vorläufige, vom Arzt gewünschte Leistungsreihenfolge je Patient $L_i(PK)$ bestimmt. Die Prioritätskennziffern sind nach Tab. 4.14.2 - 2 verteilt:

Patient	Prioritätskennziffern			
1	1	o	o	o
2	1	o	o	o
3	o	1	o	o
4	o	o	o	o
5	o	o	o	o

Tab. 4.14.2 - 2: Zuteilung der Prioritätskennziffern, Beispiel 1

Mit der Errechnung der Leistungsreihenfolge je Patient mit minimaler Belastung L_i ist der erste Teil des Algorithmus abgeschlossen:

Patient	Leistungsreihenfolge L_i				Belastung
1	17	11	1	o	4
2	17	2o	31	o	2
3	11	13	o	o	2
4	17	o	o	o	o
5	11	o	o	o	o

Tab. 4.14.2 - 3: Leistungsreihenfolgen mit minimaler Belastung, Beispiel 1

Für den weiteren Ablauf muß dem Rechner die Matrix bekannt sein, die den Patienten die verordneten Leistungen zuordnet.¹⁾ Da der Leistungsbeginn einem Knoten im Graphen entspricht, werden die Elemente dieser Matrix, die sich von Null unterscheiden, d.h. Leistungen anzeigen, mit positiven ganzen Zahlen nummeriert. Die aufsteigende Nummerierung deutet die Reihenfolge der Leistungen für einen Patienten an.

Patient	Leistung in Bedienstationsstation									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1o
1	3	o	2	o	1	o	o	o	o	o
2	o	o	o	o	4	5	o	o	6	o
3	o	o	7	o	8	o	o	o	o	o
4	o	o	o	o	9	o	o	o	o	o
5	o	o	1o	o	o	o	o	o	o	o

Tab. 4.14.2 - 4: Zuordnungsmatrix Patient - Leistung - Bedienstationsstation, Beispiel 1

1) Vgl. hierzu Abschnitt 4.6.1

Analog ist die Matrix der Tätigkeitsdauern aufgebaut (siehe Tab. 4.14.2 - 5). In diesem Beispiel wurde als deterministisches Äquivalent jeweils das 50 %-Fraktil der Tätigkeitsdauerverteilungen gewählt. Die Zeiteinheit ist [Minuten].

Der Beginn der Untersuchungstätigkeiten lag in allen Bedienungsstationen beim Zeitpunkt 0.

Patient	Tätigkeitsdauer für eine Leistung in Bedienungsstation									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	23	0	21	0	57	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	57	50	0	0	22	0
3	0	0	21	0	44	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	57	0	0	0	0	0
5	0	0	21	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 4.14.2 - 5: Matrix der Tätigkeitsdauern, Beispiel 1

Diese beiden Matrizen werden dazu verwendet, um einerseits eine spezielle Adjazenzmatrix aufzubauen, durch die der Graph des Reihenfolge- und Terminierungsproblems im Rechner dargestellt wird, und andererseits eine weitere hierzu analoge Tätigkeitsmatrix zu bilden.

Hierzu wird in die Knotennummerierung der Anfangs- und Endknoten einbezogen und alle anderen Knoten erhalten damit geänderte Zahlen. Die neue Knotennummer ist die alte Knotennummer +1.

Dieser Graph Z stellt sich nun, wie in Abb. 4.14.2 - 1 gezeigt, dar.

Im nächsten Schritt wird die erste zulässige Lösung berechnet.¹⁾ Als Zielfunktion wird hierbei die in (4.12 - 3) angegebene Beziehung verwendet, die die Gesamtdurchlaufzeit minimiert.

Der Graph $Z \cup D$, der sich dann ergibt, ist in Abb. 4.14.2 - 2 zu sehen.

Abb. 4.14.2 - 3 stellt den Entscheidungsbaum bis zu diesem Zeitpunkt dar.

1) Vgl. hierzu Abschnitt 4.6.3.

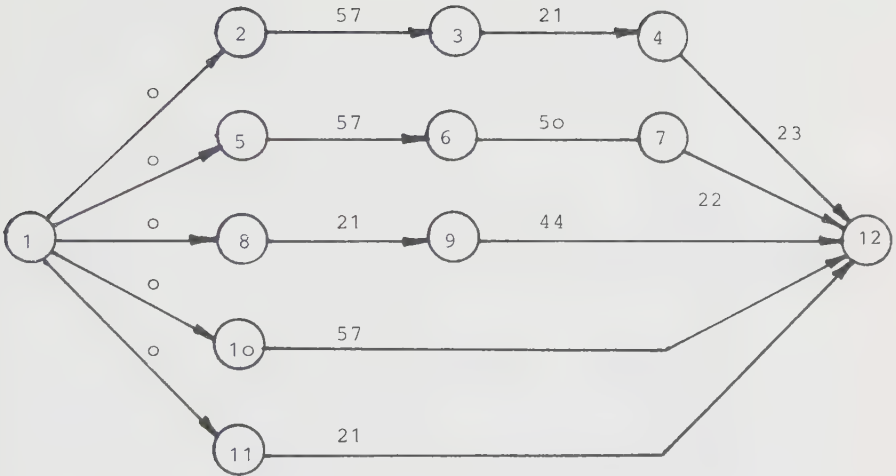


Abb. 4.14.2 - 1: Graph Z, Beispiel 1

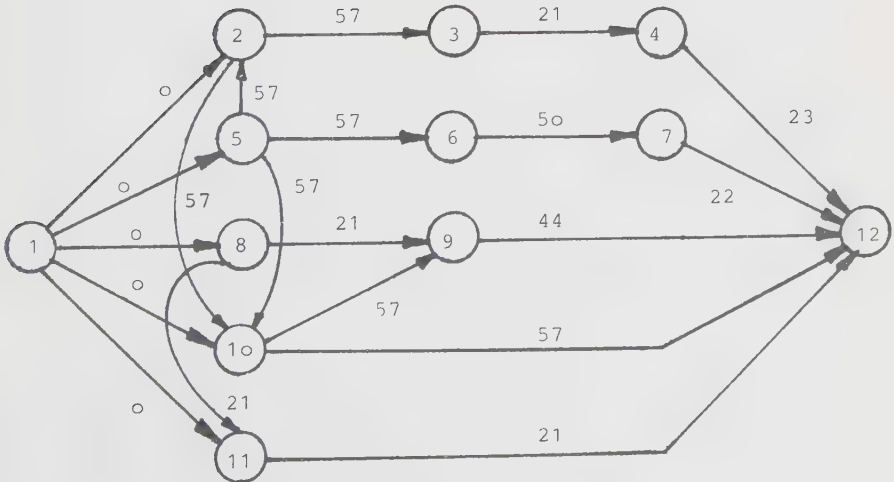


Abb. 4.14.2 - 2: Graph ZUD der ersten, zulässigen Lösung, Beispiel 1

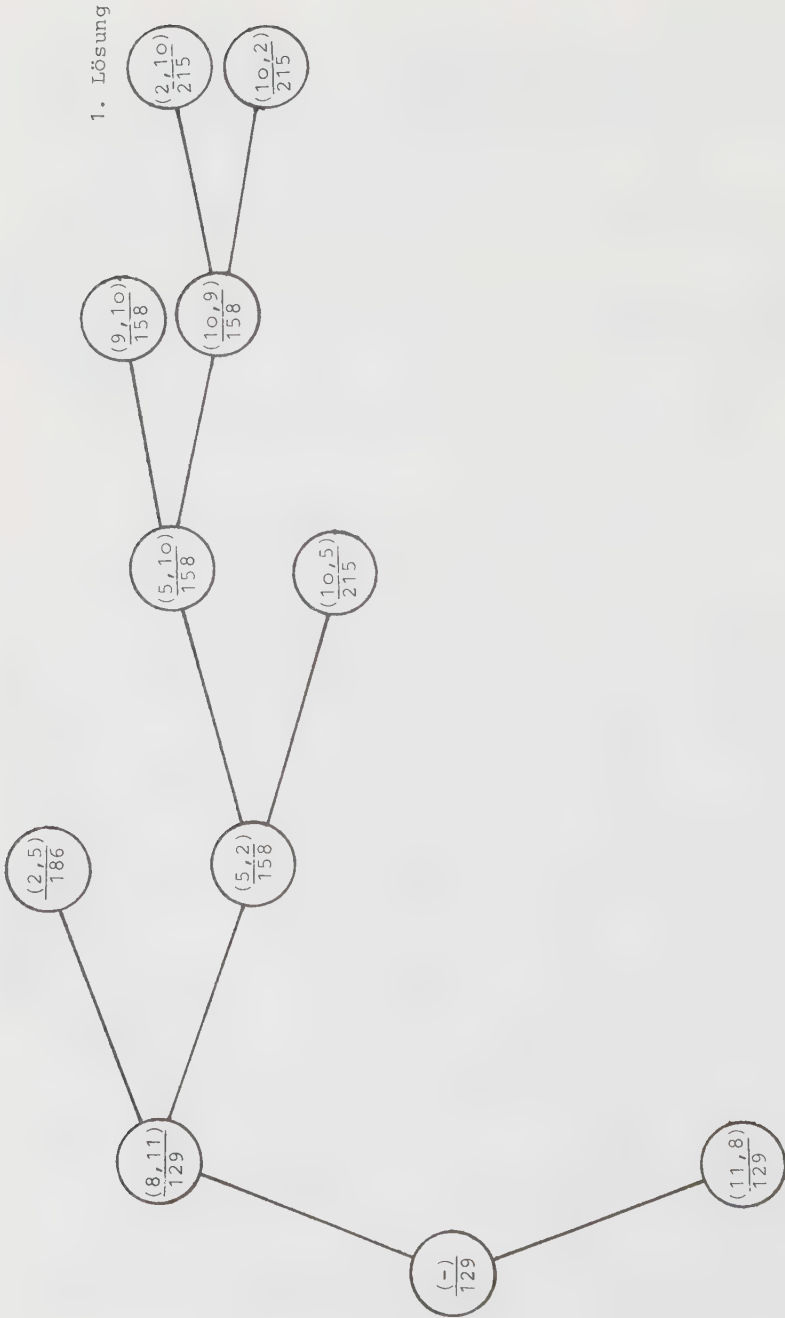


Abb. 4.14.2 - 3: Entscheidungsbaum bis zur ersten, zulässigen Lösung, Beispiel 1

Es folgt anschließend der in Abschnitt 4.6.4 beschriebene Branch-and-Bound-Algorithmus. Im vorliegenden Beispiel 1 stellt sich heraus, daß die erste gefundene, zulässige Lösung schon die optimale Lösung a^* darstellt. Das Branch-and-Bound-Verfahren hat also in diesem Fall nur den Zweck, die Optimalität der ersten Lösung nachzuweisen.

Für den in Abschnitt 4.7 beschriebenen Approximationsalgorithmus wurde $\epsilon = 1\%$ gesetzt. Eine Reduzierung der Schranke S war jeweils nach n durchsuchten Knoten des Entscheidungsbaumes vorgesehen. n war die Zahl der Knoten des Graphen Z .

Es wurde zwar die optimale Lösung exakt gefunden, dennoch kann aufgrund des Einsatzes des Approximationsalgorithmus streng genommen nur von einer Näherungslösung gesprochen werden, da ja - jedoch nicht in diesem Beispiel - prinzipiell eine Lösung denkbar wäre, die besser als die bis zum Abbruch des Programms gefundene ist.

Das bedeutet, daß die Zielfunktion einer etwaigen, besseren Lösung als der gefundenen nur im abgeschlossenen Intervall $[208.55, 215]$ [Minuten] liegen kann, da der Vorgang der Herabsetzung der Schranke S auf $ZF - \epsilon$ dreimal vorgenommen wurde. D.h. die gefundene Lösung approximiert die optimale Lösung auf 3% genau. Zufällig ist hier approximierte und exakte Lösung identisch.

Das in 4.8 erläuterte Reduktionsverfahren führte schon hier zu einer Verminderung der Reihenvorgänge.

Die optimale Lösung, d.h. ein vollständiger Reihenfolge- und Terminplan für das Tagesprogramm der Patienten des Beispiels 1 ist in Tab. 4.14.2 - 6 zusammengestellt.

Die CPU-Rechenzeit betrug bei diesen und den folgenden Beispielen auf der CDC 3300 bei unbekannter Auslastung der Maschine einschließlich Übersetzung ca. 1 Minute.

In einem Beispiel 2 wurde mit $\epsilon = 20\%$ der Approximationsalgorithmus drastisch verschärft.

Patient	Bedienungsstation	medizinische Tätigkeit	
		Art	Beginn [Minuten]
1	5	17	57
	3	11	114
	1	1	135
2	5	17	0
	6	20	57
	9	31	107
3	3	11	0
	5	13	171
4	5	17	114
5	3	11	21

Tab. 4.14.2 - 6: Reihenfolge- und Terminplan für das Tagesprogramm der Patienten, Beispiel 1

Damit wurde erreicht, daß das Programm erheblich weniger Knoten des Entscheidungsbaumes zu durchsuchen hat. Die Lösung ist in diesem Fall allerdings nur mit einer Genauigkeit von 20 % gegeben.

Als Alternative zum 50 %-Fraktile der Verteilungen von Beispiel 1 wurde in Beispiel 3 dasselbe Problem mit 84,3 %-Fraktile bei gleicher Zielfunktion gerechnet.

Hierbei erhöhte sich der Zielfunktionswert von 158 [Minuten] auf 228 [Minuten]. Die Lösung selbst blieb jedoch die gleiche. Allerdings gilt dies nicht allgemein. Aufgrund der unterschiedlichen Gestalt der Tätigkeitsdauervertelungen ist es möglich, daß sich Fraktile ergeben, die den Entscheidungsprozeß in alternative Zweige des Entscheidungsbaumes lenken.

In einem weiteren Beispiel 4 wurde die Auswirkung einer Zielfunktion gemäß Beziehung (4.12 - 4), d.h. unter Einbeziehung der Geräteleerzeiten, untersucht. Es wurden hier wieder 50 %-Fraktile verwendet. Die Gewichtungsfaktoren g wurden mit 1 angesetzt. Dies kann dahingehend interpretiert werden, daß eine

Leerzeiteinheit pro Bedienungseinheit ebensoviel Kosten verursacht wie eine Einheit eines Arbeitstages aller Bedienstationen zusammen.

In diesem Fall kann jedoch aus dem oben erläuterten Grund der Reihenfolge- und Terminierungsalgorithmus nur bis zur ersten zulässigen Lösung verwendet werden. Es ergibt sich wiederum die gleiche Lösung wie bisher, der Zielfunktionswert beträgt 586. Es zeigt sich damit, daß u.U. beträchtliche, ablaufbedingte Leerzeiten auftreten können.

Dies gilt natürlich in verstärktem Maße, wenn wie in Beispiel 3 etwa 84,13 %-Fraktile als deterministische Äquivalente verwendet werden.

Mit diesen Beispielen sollte lediglich ein Eindruck von der Fähigkeit des Algorithmus, der Reihenfolge- und Terminierungspraxis im Krankenhaus gerecht zu werden, aufgezeigt werden. Das volle Spektrum der Einsatzmöglichkeiten ist damit nicht ausgeschöpft. Diese sind durch die speziellen Wünsche und Probleme des Anwenders im Krankenhaus determiniert.

Auch Reihenfolgeprobleme größerer Art, mit Patientenzahlen in der Größenordnung 100, sind wegen des variablen Approximationsalgorithmus jederzeit lösbar.

Bei extrem großer Patientenzahl kann schließlich auf die Heuristik zur Ermittlung einer zulässigen Lösung und Abspeichern der Matrizen auf Massenspeicher übergegangen werden.

5. KRANKENHAUSGESAMTMODELLE

5.1 Langfrist-/Kurzfrist-Modelle

Es soll in diesem Abschnitt zuerst auf Modelle der Langfristplanung eingegangen werden, die zwar Auswirkungen auf die Ablaufplanung im Gesamtkrankenhaus haben bzw. auch Variable der Dimension Zeit aufweisen, aber hauptsächlich für die Zwecke der Investitions- und Personalplanung verwendet werden.

Es sind hier statische und dynamische Modelle zu unterscheiden.

Unter Modellen der Ablaufplanung (Kurzfristmodelle) für das Gesamtkrankenhaus sollen auch solche verstanden werden, die nur Teilaspekte auf Gesamtkrankenhausebene darstellen oder den gesamten Ablauf nur sehr global z.B. durch Verweildauerverteilungen abbilden.¹⁾

5.2 Langfrist-Modelle

5.2.1 Statische Betrachtungsweise

Bisher wird bei der langfristigen Krankenhausplanung für die funktionale und quantitative Auslegung von Krankenhäusern mit Kennziffern²⁾, z.B. Zahl der Erwerbstätigen einer Region pro Bett, Zahl der Ärzte pro Bett usw., gearbeitet.

Derartige pauschale Kriterien können jedoch angesichts der gewaltigen Investitionskosten für Krankenhäuser nicht genügen. Sie haben sogar zusammen mit politischen Fehlentscheidungen zu einer falschen qualitativen Verteilung der Krankenhauseinrichtungen, insbesondere der Betten, und zu einem Überhang der Bettenkapazität in der Bundesrepublik insgesamt geführt.³⁾

Modelle, die ein Krankenhaus als ganzes mittels OR-Methoden abbilden, existieren gegenwärtig noch nicht. Allerdings sind bestimmte Teilaspekte auf einer Ebene, die sämtliche Lei-

1) Zur Problematik der Simultanplanung von komplexen Systemen siehe etwa Steinmann u.a. (1974), S. 12.

2) Vgl. Eichhorn (1974), S. 56.

3) Seeler (1973).

stungsstellen überdeckt, in der Literatur zu finden.

Langfrist-Modelle, die die Größe und Ausstattung der Leistungsstellen im Krankenhaus bestimmen, bedienen sich bevorzugt der linearen Programmierung.¹⁾ Vora gibt als Zielfunktion eine Summe von externen und internen Kosten an, die bei der Befriedigung eines gewissen, vorgegebenen Bedarfs an medizinischer Dienstleistung entsteht. Er stellt in seinem Modell jedoch lediglich auf Leistungen ab, die mit Hilfe von Geräten erbracht werden. Pflegerische oder medizinische Leistungen, die keiner Geräte bedürfen, z.B. Visite, gehen nicht ein. Im Restriktionsenteil werden unter anderem die durchschnittlichen Zeiten für die Erstellung einer Leistung verwendet. Hier zeigt sich, daß auch bei derartigen aggregierten Modellen Daten der Leistungselemente eingehen, und damit deren Ermittlung eine notwendige Voraussetzung für diese Modelle ist.

Schneider und Kilpatrick²⁾ verwenden ebenfalls einen Ansatz der mathematischen Programmierung. Ihr Ziel ist jedoch im Gegensatz zu Vora die Bestimmung der optimalen Personalstärke im Krankenhaus.

Ein völlig anders geartetes Krankenhausmodell als die bisher betrachteten schlagen Pauly und Redish³⁾ vor. Sie entwickeln mittels der üblichen volkswirtschaftlichen Gleichgewichtsbeschreibungen ein mikro-ökonomisches Beschreibungsmodell. Es basiert auf der Vorstellung, daß Krankenhäuser, ähnlich wie jugoslawische Produktionsbetriebe, warenproduzierende Organisationen sind, deren Mitglieder kooperativ auf einer egalitären Basis zusammenarbeiten, als Ganzes gesehen in einem demokratischen Prozeß autonome Entscheidungen treffen und deren Ziel es ist, ihren materiellen und immateriellen Nutzen zu maximieren.

Derartige Voraussetzungen sind in der Bundesrepublik wohl in keinem Krankenhaus gegeben. Weder kann das Krankenhauspersonal autonome Entscheidungen treffen, dies kann nicht einmal

1) Z.B. Fischer (1975); Vora (1974).

2) Schneider, Kilpatrick (1975).

3) Pauly, Redish (1973).

der Krankenhausträger, da er z.B. an das Krankenhausfinanzierungsgesetz gebunden ist. Noch arbeitet das Krankenhauspersonal auf einer egalitären Basis zusammen. Es ist vielmehr eine deutlich ausgeprägte hierarchische Personalstruktur vorzufinden. Andererseits trifft dort, wo diese Hierarchie weitgehend abgebaut ist, z.B. im Gemeinschaftskrankenhaus Herdecke, die Voraussetzung der Nutzenmaximierung so pauschal nicht zu.¹⁾

Als weitere gravierende Annahme liegt dem Modell zugrunde, daß sich der Preis für eine Krankenhausleistung nach der Nachfrage richtet oder genauer, daß die Preis-Nachfrage-Funktion für die Nachfrage nach Dienstleistungen, die im Krankenhaus erbracht werden können, den üblichen konkaven Verlauf einer Haushaltsnachfragekurve bei normaler Reaktion aufweist. Auch dies ist in der Bundesrepublik nicht anzutreffen, vielmehr liegt der Fall einer vollständig unelastischen Nachfrage vor, da die Preise sich nicht frei auf dem Markt bilden, sondern zwischen Krankenkassen und Krankenhäusern festgelegt werden, die Nachfrage der Patienten, d.h. der Verbraucher von Dienstleistungen der Krankenhäuser von ihrem Krankenkassenbeitrag aber praktisch unabhängig ist. Insgesamt gesehen, scheint die hier angedeutete Vorgehensweise der Modellbildung zumindest für die Bundesrepublik nicht zweckmäßig.

5.2.2 Dynamische Betrachtungsweise

Kao²⁾ stellt den Durchgang von Patienten mit Kreislaufkrankheiten durch Leistungsstellen eines Krankenhauses mittels eines Semi-Markov-Prozesses³⁾ dar. Dabei wird eine Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix verwendet, deren transiente und absorbierende Zustände die einzelnen Leistungsstellen bzw. Entlassung oder Tod der Patienten darstellen. Die Verweilzeiten

1) Gemeinschaftskrankenhaus Herdecke (1975), S. 2.

2) Kao (1974).

3) Statt konstanter, gleicher Zustandsdauern werden beim Semi-Markov-Prozeß Verteilungen von Zustandsdauern eingeführt. Genauer dazu siehe Störmer (1970), S. 26 ff.

in den Zuständen gehorchen stetigen Verteilungen. Damit läßt sich in den einzelnen Leistungsstellen die jeweilige Zahl von Patienten, die mit bestimmten Diagnosen in das Krankenhaus kommen, ermitteln. Hieraus gewinnt man bei einer vorgegebenen Zahl von aufzunehmenden Patienten Aussagen über notwendige Kapazität und Personalstand der Leistungsstellen.

Gudaitis und Brown¹⁾ benutzen ein System von Zustandsvektoren und Strukturmatrizen zur dynamischen Abbildung des Gesamtkrankenhauses, das folgende Form besitzt:

$$(5.2.2 - 1) \quad \begin{bmatrix} U(t+1) \\ Y(t) \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} U(t) \\ X(t) \end{bmatrix}$$

$U(t)$, $U(t+1)$ Vektoren der Zustandsvariablen zu den Zeitpunkten t und $t+1$

$X(t)$ Vektor der Inputvariablen zum Zeitpunkt t

$Y(t)$ Vektor der Outputvariablen zum Zeitpunkt t

S charakteristische, zeitinvariante Struktur des Krankenhauses

Das Krankenhaus wird in die Sektoren

- Physikalische Leistungsstellen
- Personal
- medizinische Leistungsstellen
- nicht-medizinische Leistungsstellen
- Patienten
- Administration

aufgegliedert.

Diese Sektoren wirken aufeinander ein und sind dazu noch Einflüssen von außerhalb des Krankenhauses ausgesetzt. Durch iterative Operationen von der Art der Beziehung (5.2.2 - 1) werden die Zustands- und Outputvektoren der einzelnen Teilbereiche fortgeschrieben. Als Beispiel sei der Patientensektor aufgeführt (Abb. 5.2.2 - 1).

1) Gudaitis, Brown (1975).

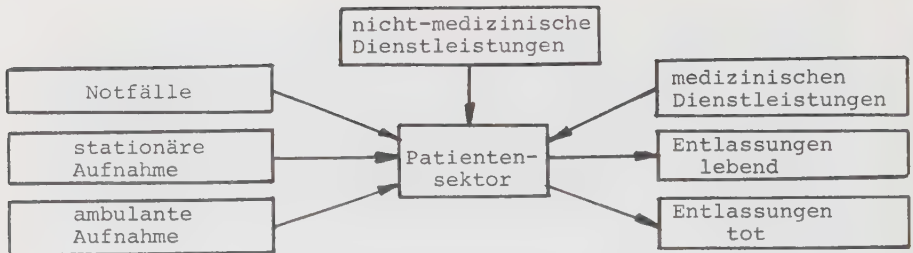


Abb. 5.2.2 - 1: Patientensektor des Modells von Gudaitis und Brown

Mittels folgender rekursiver Beziehungen werden Zustandsvektor $p(t)$ und Outputvektor $d(t)$ des Patientenvektors fortgeschrieben:

$$(5.2.2 - 2) \quad p(t) = P(t) p(t-1) + A(t) a(t)$$

$p(t)$ = Zahl der Patienten der verschiedenen medizinischen Kategorien zur Zeit t

$P(t)$ = Übergangsmatrix zwischen den Patienten Kategorien

$A(t)$ = Verteilungsmatrix, die den Übergang von Patienten in den Patienten Kategorien bestimmt

$a(t)$ = Zahl der Patienten, die zum Zeitpunkt t angekommen sind

$$(5.2.2 - 3) \quad d(t) = D(t) p(t) + D'(t) p(t)$$

$d(t)$ = Zahl der Patienten der verschiedenen Kategorien, die das Krankenhaus bis zum Zeitpunkt t ¹⁾ verlassen.

$D(t)$ = Matrix, die das Verhältnis der Patienten der verschiedenen Kategorien²⁾ festlegt, die das Krankenhaus bis zum Zeitpunkt t lebend verlassen.

$D'(t)$ = Matrix, die das Verhältnis der Patienten der verschiedenen Kategorien festlegt, die im Krankenhaus bis zum Zeitpunkt t sterben.

1) D.h. zwischen $t-1$ und t .

2) Unter Patienten Kategorien verstehen Gudaitis und Brown Patienten, die in internistische, chirurgische, gynäkologische Abteilungen des Krankenhauses eingewiesen werden.

Ähnliche Beziehungen werden für die übrigen Sektoren aufgestellt. Dazu kommt dann noch die Ermittlung der direkt zu-rechenbaren Kosten, die völlig analog geschieht.

Das Modell stellt also ganz darauf ab, die kostengünstigste Faktorkombination zu bestimmen. Für die Versorgung des Modells mit den nötigen Struktur- und Eingangsdaten sind umfangreiche Erhebungen nötig. Gegenüber dem Semi-Markov-Modell von Kao umfaßt dieses Modell sämtliche Sektoren des Krankenhauses und nicht nur den Patientenfluß. Bei Kao ist statt der zwei Beziehungen (5.2.2 - 2) und (5.2.2 - 3) von Gudaitis und Brown nur eine Übergangswahrscheinlichkeitsmatrix vorgesehen, in die Todesfälle als absorbierende Zustände integriert sind.

Zuletzt sei noch eine Art der dynamischen Krankenhausmodelle erwähnt, das Planspiel. Planspiele sind schon für einige Bereiche entwickelt worden, wie z.B. ein Gesamtbetriebs-Planspiel¹⁾ oder ein Planspiel für die Elektrizitätswirtschaft.²⁾

Ihre Aufgabe ist es, auf einer relativ hohen Aggregations-ebene Entscheidungsfindungen, z.B. im Rahmen einer Ausbildung, zu üben.

5.3 Ablaufplanung für das gesamte Krankenhaus (Kurzfrist-Modelle)

Modelle der Ablaufplanung, die zumindest einen Bereich von der Ebene des Gesamtkrankenhauses aus beschreiben, sind noch kaum entwickelt worden. Allenfalls existieren Verfahren zur rechnerischen Terminierung und Arbeitsplanung, die jedoch lediglich die Leistungsverordnungen eines Tages so sortieren, daß Arbeitslisten und von Ärzten bzw. Schwestern festgelegte Termine für die Patienten herausgegeben werden können.³⁾ Diese Systeme haben nur eine registrierende und dokumentierende Funktion, eine Planung nach einer Zielfunktion erfolgt nicht. Für den Bereich der Patientenaufnahme ist allerdings ein rech-

1) IBM (1974).

2) Lienhard, Steiger, Weber (1975).

3) Vgl. Barrett u.a. (1975); Beggs u.a. (1971); Cederlund (1970); Stockholms Läns Lansting (1972); Wilde, Rudolph (1974).

nergestütztes, dialogfähiges Modell vorgeschlagen worden, mit dem die Aufnahme Termine von stationären Patienten eingeplant werden können.¹⁾

Abb. 5.3. - 1 zeigt den Patientenfluß durch ein Krankenhaus, wie er diesem Modell zugrunde gelegt wurde. Wie aus der Abbildung zu sehen ist, beeinflussen die Notfälle den Aufnahme prozeß der stationären Patienten dadurch, daß sie abgesehen von der Intensivstation Betten der übrigen Stationen belegen. Daher muß eine Notfallkapazität an Betten reserviert werden.

Die Restkapazität der Stationen kann der Aufnahmearzt frei verplanen. Dies geschieht entweder dadurch, daß der Patient einen ihm zusagenden Aufnahme termin nennt, oder daß der Arzt es dem System überläßt, den frühest möglichen Termin auszuwählen. Die maschinelle Einplanung des Termin berücksichtigt dabei die charakteristischen Verweildauern sämtlicher entweder schon in der Klinik befindlichen oder bereits fest eingeplanten Patienten.

Andere Arbeiten in der Literatur wenden analytische Verfahren sowie Simulationstechniken bei der Behandlung des Aufnahmeplanungsproblems an.³⁾ Über diese Ansätze hinausgehende Vorstellungen zur Ablaufplanung im gesamten Krankenhaus wurden bisher anscheinend nur von Matthes⁴⁾ entwickelt. Dort werden Terminierungsprobleme mit Hilfe stochastischer Netzplanverfahren behandelt. Allerdings geschieht dies nur durch rein formale Beziehungen, so daß noch nicht zu sehen ist, inwieweit Anwendungen möglich sind. Insgesamt gesehen scheitern detaillierte Modelle der simultanen Behandlung sämtlicher Bereiche des Krankenhauses an der gewaltigen Datenmenge, die zur Modellversorgung notwendig ist, sowie an der äußerst komplexen Struktur des Untersuchungsobjektes.

Als weiteres Beispiel für die Behandlung des Teilaspektes der Ablaufplanung auf Gesamtkrankenhausebene ist für die kurzfristige Einplanung von Schwestern das Modell von Trivedi⁵⁾ zu nennen, das einen optimalen Schwesterneinsatzplan durch ein Branch-and-Bound-Verfahren bestimmt.

1) Meyer, Schläger (1975).

2) Die Abbildung ist Meyer, Schläger (1975), S. 125 entnommen.

3) Kolesar (1970); Smith, Solomon (1966).

4) Matthes (1973).

5) Trivedi (1976).

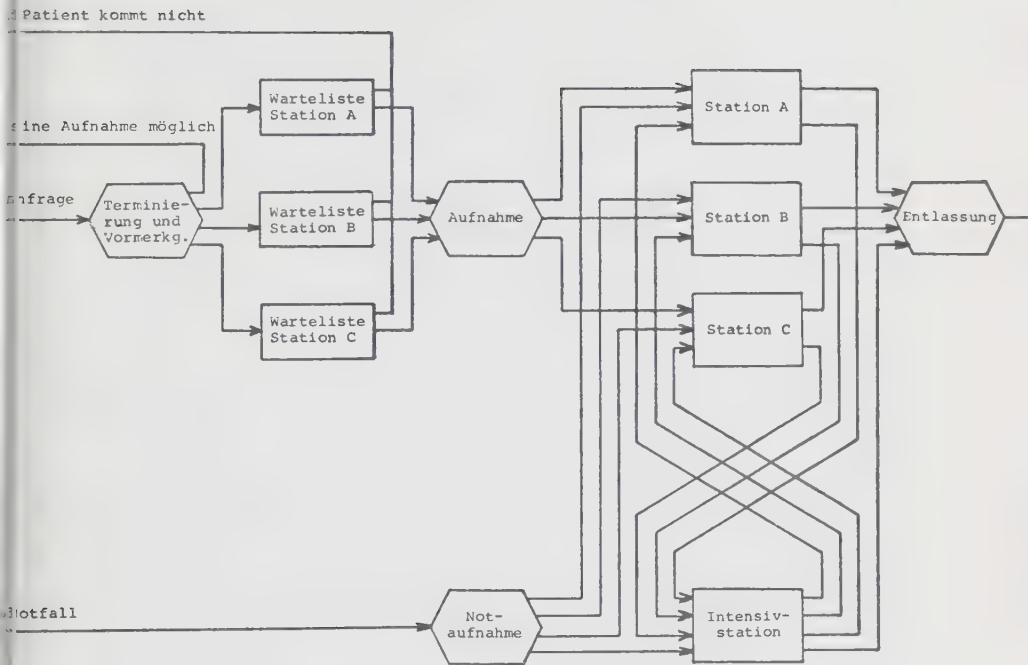


Abb. 5.3 - 1: Patientenaufnahmeplanung

5.4 Layoutplanung als Beispiel für die Interdependenz von Langfrist- und Kurzfristplanung im Krankenhaus

In den oben beschriebenen Modellen kam immer wieder die wechselseitige Abhängigkeit von Langfristplanung und Kurzfristplanung (Ablaufplanung) zum Ausdruck.

Ein Bereich möglicher Planungsaktivitäten im Krankenhaus soll nun unter diesem Gesichtspunkt anhand eines Beispielles verdeutlicht werden. Es ist dies die Anordnung von Räumen und Geräten im Gesamtkomplex eines Krankenhauses.

Während in der Praxis die Entscheidung über diese Anordnung Ergebnis des Kräftespiels von Architekten, Ärzten und Bauträgern ist, soll hier versucht werden, ein transparentes und

quantifizierbares Entscheidungskriterium einzuführen.

Es wird sich zeigen, daß die langfristigen Entscheidungen insbesondere die baulichen Maßnahmen auch vom prognostizierten Ankunftsprozeß der Anforderungen und von der geplanten Arbeitsorganisation der Leistungsstellen abhängen, soweit es sich um einen Neubau handelt.

Auf der anderen Seite ist klar, daß eine bestimmte, räumliche Struktur Auswirkungen auf den Ablauf der Leistungsstellen hat.

Im nachfolgenden Beispiel hat man es jedoch mit der Struktur eines existierenden Krankenhauses zu tun, so daß nur noch eine ex-post-Analyse möglich ist.

Die Layoutplanung kann allerdings nicht nur bei Krankenhausneubauten, sondern auch für Um- und Erweiterungsneubauten eingesetzt werden. Unter Umständen erfordert sie keine baulichen Maßnahmen, sondern lediglich Umordnen von Einrichtungen und Geräten.

Immer hat sie eine optimale Zuordnung von Krankenhauseinrichtungen zum Ziel.

Sind Räume und Geräte günstig zueinander angeordnet, können Leistungen schnell und kostensparend erbracht werden. Abb. 2.2 - 1 zeigt, daß eine sinnvolle Zuordnung Auswirkungen auf mehrere Leistungselemente hat und somit die Erstellung der gesamten Leistung beeinflusst. Damit wird aber auch der Arbeitsablauf auf der Ebene der Leistungsstellen beeinflusst. Da ein Raum bzw. ein Gerät oftmals für unterschiedliche Leistungen verwendet wird, stellt sich das Problem, für sämtliche Leistungen die betreffenden Räume und Geräte möglichst günstig anzuordnen.

Für diese Fragestellung bieten sich die Layout-Verfahren an. Derartige Verfahren werden in Fertigungsbetrieben z.B. zur Anordnung von Maschinen in einer Maschinenhalle verwendet. Ziel ist hierbei im allgemeinsten Fall die Minimierung der Transportkosten:

$$(5.4 - 1) \quad K = \sum_{i, j \in OE} k_{ij} c_{ij} d_{ij} \rightarrow \min!$$

- K = gesamte Transportkosten
 k_{ij} = anteilige Transportkosten $\left[\frac{\text{DM}}{\text{Ladungseinheit Entfernungseinheit}} \right]$
 c_{ij} = Transportintensität $[\text{Ladungseinheit/Zeiteinheit}]$
 d_{ij} = Transportweg $[\text{Entfernungseinheit}]$
 OE = Menge der einzuplanenden organisatorischen Einheiten
 (z.B. Geräte), zwischen denen Transporte auftreten.

Die Dimension der Größe K beträgt $[\text{DM/Zeiteinheit}]$

Die Größe c_{ij} gibt an, wie stark die Beziehung zwischen den organisatorischen Einheiten i und j ist.

Unter dem Transportweg versteht man den Abstand zwischen den organisatorischen Einheiten i und j, wobei die Lage der Einheiten im Raum durch ein kartesisches Koordinatensystem festgelegt ist.

Der Faktor k_{ij} stellt die Kosten dar, die beim Transport einer Ladungseinheit über eine Entfernungseinheit von i nach j entstehen.

Der Begriff des Abstandes wird folgendermaßen definiert¹⁾:

Es seien a, b, c Elemente einer nicht-leeren Menge X.

Dann ist auf der Produktmenge $X \times X$ eine reellwertige Funktion d (Abstandsfunktion) erklärt, die folgende Axiome erfüllt:

- (i) $d(a, b) \geq 0$ und $d(a, a) = 0$
- (ii) $d(a, b) = d(b, a)$ (Symmetrie)
- (iii) $d(a, c) \leq d(a, b) + d(b, c)$ (Dreiecksungleichung)
- (iv) wenn $a \neq b \Rightarrow d(a, b) > 0$

Die reelle Zahl $d(a, b)$ wird der Abstand zwischen a und b genannt. Faßt man schließlich jedes Element $a \in X$ als Koordinatenangabe in einem kartesischen Koordinatensystem auf, so gelangt man zum Abstand zweier Punkte in der Ebene.

Allerdings erfüllen verschiedene Abstandsfunktionen die Axiome (i) - (iv). Für das verwendete Programm HEROS wurde eine rechtwinklige²⁾ Wegmessung gewählt:

1) Lipschutz (1965), S. 111 f.

2) Zur Begründung siehe Hardeck, Schmid (1974), S. 6 ff. Als Weg zwischen zwei organisatorischen Einheiten ist der Abstand ihrer geometrischen, 2-dimensionalen Schwerpunkte zu verstehen.

$$(5.4 - 2) \quad d(a, b) = |a_x - b_x| + |a_y - b_y|^{1)}$$

Wie für die Kostenermittlung im Krankenhaus generell, gilt auch hier, daß diese Kostenanteile nur sehr aufwendig bestimmt werden können.

Daher kann man sich auch mit einer reduzierten Zielfunktion begnügen:

$$(5.4 - 3) \quad T = \sum_{i,j \in I} c_{ij} d_{ij}^{2)} \rightarrow \min!$$

Die Dimension des Transportaufwandes T ist hier

$$\left[\frac{\text{Ladungseinheit} \cdot \text{Entfernungseinheit}}{\text{Zeiteinheit}} \right]$$

Es wird vorausgesetzt, daß der kürzeste Weg der billigste ist und die stärkste Transportbelastung die höchsten Kosten verursacht.

Ein direkter Wirtschaftlichkeitsvergleich verschiedener Anordnungen ist jetzt nicht mehr möglich. Man kann im Falle der Leistungserstellung im Krankenhaus indirekte Schlüsse bezüglich des monetären Aufwandes ziehen.

Sinkt der Transportaufwand, sinkt auch der zeitliche Anteil dieses Aufwandes an einer Einzelleistung. Der zeitliche Aufwand wiederum ist mit einem bestimmten - unbekannten - Kostenfaktor verbunden, der dann ebenfalls vermindert würde. Damit würde die Einzelleistung insgesamt einen geringeren Aufwand erfordern.

Darüber hinaus hat allerdings eine günstige Anordnung von organisatorischen Einheiten Auswirkungen auf den Arbeitsablauf von Leistungsstellen bezüglich ihrer Kapazität und damit ergeben sich schließlich Konsequenzen für das Gesamtkrankenhaus bezüglich Kapazität und Verweildauer. Diese Konsequenzen wer-

1) Hier bedeutet beispielsweise $|a_x - b_x|$ den Betrag des Ausdrucks $a_x - b_x$. Diese Darstellung ist nicht zu verwechseln mit dem Ausdruck für die Mächtigkeit einer Menge!

2) Der Weg d_{ij} zwischen den organisatorischen Einheiten i und j ist also der durch (5.2 - 2) definierte Abstand zwischen den Schwerpunkten von i und j.

den geringfügig sein, sofern nur wenige organisatorische Einheiten im Krankenhaus günstig eingeplant sind. Wendet man diese Verfahren jedoch im gesamten Krankenhaus an, so dürfte der positive Effekt beträchtlich sein. Von Vorteil ist bei den Layout-Verfahren, daß sie schon seit geraumer Zeit in verschiedenen Versionen in der routinemäßigen Anwendung zum Einsatz kommen und damit dem Planenden der Aufwand der Programmerstellung abgenommen wird.

Das verwendete Programm HEROS basiert auf einem heuristischen Verfahren von Günther. Es hat sich in der Praxis bewährt. Eine ausführliche Darstellung ist bei Hardek und Schmid zu finden.¹⁾

Neuere Untersuchungen haben allerdings ergeben, daß manche der rechnergestützten Layout-Verfahren den üblichen "visuellen" Methoden höchstens gleichwertig sind.²⁾ Dies rührt daher, daß diese Verfahren die Einplanung von organisatorischen Einheiten nach einer bestimmten, festen Vorgehensweise vornehmen, die keine Ausnahmeregelung kennt und sich ausschließlich auf das Planungskriterium Fläche der organisatorischen Einheiten abstützt. So muß der Anwender z.B. selbst Sorge tragen, daß jede Einheit auch tatsächlich erreichbar ist und nicht durch eine andere verstellt wurde.

Der Kritik von Scriabin und Vergin ist jedoch entgegenzuhalten, daß der Aufwand, der bei den visuellen Methoden für jedes einzelne Planungsprojekt erneut getrieben werden muß, sicher höher ist als die Handhabung eines ausgetesteten Rechnerprogrammes.

Außerdem dürfte wohl bei größeren, unter Umständen mehrstöckigen Projekten die Transparenz und Übersichtlichkeit des Rechenverfahrens größer sein als bei der Planung von Hand. Weiter ist noch zu bedenken, daß in den rechnergestützten Verfahren unterschiedliche Konfigurationen z.B. bezüglich des Grundrisses eines Gebäudes und deren Auswirkungen auf den Transportaufwand rasch untersucht werden können.

Zudem eröffnet die Einführung von dialogfähigen Methoden die

1) Hardeck, Schmid (1974).

2) Scriabin, Vergin (1975).

Möglichkeit, spezielle Kenntnisse von Fachleuten bezüglich der Anforderungen an den Gesamtkomplex des Planungsprojektes einzubringen und damit die Vorteile der "visuellen" Methode mit denen der rechnergestützten Verfahren zu kombinieren.

5.4.1 Layout-Planung mit HEROS¹⁾

Am Beispiel einer Röntgenabteilung²⁾ soll nun gezeigt werden, welche Auswirkungen eine günstige Anordnung von organisatorischen Einheiten auf die Leistungserstellung hat.

Dazu werden als organisatorische Einheiten die Räume der Röntgenabteilung definiert. Abb. 3.2.2.2.1 - 1 zeigt den Grundriß der Röntgenabteilung und die gegenwärtige Anordnung der Räume.

Für die Ermittlung des Transportaufwandes gemäß (5.4 - 3) sind nun die Transportintensitäten zu bestimmen. Diese ergeben sich im Falle der Röntgenabteilung aus der Zahl der Anforderungen je Anforderungsart pro Tag. Jede Anforderungsart induziert einen Verkehr zwischen den verschiedenen Räumen der Röntgenabteilung. D.h. die Räume der Röntgenabteilung werden als organisatorische Einheiten interpretiert.

So kommen die Patienten vom Wartezimmer in den Röntgenraum und zurück, die medizinisch-technischen Assistentinnen (MTA) transportieren Filme von den Röntgenräumen zu den Dunkelkammern, die Ärzte im Befundungsraum begeben sich in die Durchleuchtungsräume usw.³⁾ Alle diese Vorgänge werden als gleichgewichtig⁴⁾ angesehen. Somit ist lediglich ihre Häufigkeit⁵⁾ relevant.

1) Die Ergebnisse dieses und des nächsten Abschnitts kamen mit freundlicher Unterstützung von Herrn Dipl.Math. W. Hardeck zustande, der sein dialogfähiges Layoutprogramm zur Verfügung stellte.

2) Es handelt sich hierbei um die in Abschnitt 3.2 ausführlich beschriebene Röntgenabteilung der Medizinischen Klinik der Universität Erlangen-Nürnberg.

3) Eine detaillierte Beschreibung der Vorgänge erfolgte in Abschnitt 3.2.

4) Es sind Bereiche im Krankenhaus denkbar, für die die Voraussetzung der Gleichgewichtigkeit nicht sinnvoll ist.

Hier ist diese Annahme jedoch berechtigt, da jeder spezifische Transport von gleicher Bedeutung für die gesamte Einzelleistung ist.
5) Eine ähnliche Vorgehensweise verwendet Massow (Massow (1973), S. 377 ff.) für Transportanalysen im gesamten Krankenhaus. Allerdings führt er eine Gewichtung der verschiedenen Transportmittel bzw. -wege ein. Die so ermittelten Intensitäten werden jedoch nicht für ein Layout-Verfahren verwendet, sondern dienen der Dimensionierung der Transportwege und -mittel.

Als Basis der Ermittlung der Häufigkeiten wurde die Zahl der Anforderungen jeder Anforderungsart pro Tag über eine Woche (einschließlich Wochenenddienst) gemittelt. Die jeweiligen Werte sind Tab. 5.4.1 - 1 zu entnehmen.

Nr.	Untersuchungsart	Mittelwert der Zahl der täglichen Anforderungen
1	Thorax	26.0
2	Trachea	0.94
3	Niere	} 5.18
4	Urogramm	
5	Retropneu	0.02
6	Bronchographie	0.02
7	Knochen	7.87
8	MDP	1.06
9	Colon	4.30
10	Galle	4.0
11	Pankreas	1.40
12	Abdomen	4.26
13	NNH	2.3
14	Angiographie	0.106
15	Lungenschicht	0.02
16	Phlepographie	0.02
17	Lymphographie	0.02
18	Pharmakardiographie	4.14

Tab. 5.4.1 - 1: Mittelwerte der Zahl der täglichen Anforderungen

Die Bestimmung der Intensitäten zwischen jedem Raum i und jedem Raum j der Röntgenabteilung soll am Beispiel der Intensität zwischen Warteraum und Aufnahmeraum 1 erläutert werden.

Obwohl alle Wege jeweils von i nach j als auch von j nach i erfolgen, wurde die Zahl der Kontakte aus rechentechnischen Gründen jeweils nur einfach gezählt.

Im Aufnahmeraum 1 werden die Anforderungsarten Thorax und Trachea angenommen. Laut Tab. 5.4.1 - 1 beträgt der Mittelwert der Anforderungen pro Tag für Thoraxuntersuchungen 26.0

Patienten und für Tracheauntersuchungen 0.94. Insgesamt werden also im Aufnahmerraum 1 im Mittel pro Tag 26.94 Patienten untersucht. Alle diese Patienten müssen vom Warteraum in den Röntgenraum. Demzufolge wurde als Intensität für diese Verbindung der Wert 26.94 angesetzt.

Ferner weist diejenige MTA, die den Arbeitsplatz im Aufnahmerraum 1 besetzt, jeweils zwei wartende Patienten in die Umkleidekabinen ein.

Der Kontakt der MTA vom Röntgenraum zum Warteraum wird daher mit der Intensität 13.47 gekennzeichnet. Insgesamt beträgt also die Kontaktintensität Warteraum - Aufnahmerraum 1 40.41. Die Dimension lautet formal Ladungseinheit/Zeiteinheit. Unter Ladungseinheit ist hier eine Person zu verstehen, die Zeiteinheit ist ein Tag.

Etwas komplizierter ist die Ermittlung der Kontakintensitäten z.B. für D 2 - Warteraum. Hier werden die Untersuchung von MDP, Colon, Galle (oral), Abdomen, Pharmakardiographie vorgenommen.

Es ist zu beachten, daß sich die Patienten für die Durchleuchtungsräume im Verhältnis 1:2 (Privatpatienten : Kassenpatienten) auf D 1 und D 2 aufteilen und nur ca. 30 % aller oralen Gallen- sowie Abdomenuntersuchungen in D 1 und D 2 eingewiesen werden. Prinzipiell werden aber auch hier Anforderungsmittelwerte zu einer Intensität zusammengefaßt.

Diese Vorgehensweise kann man nun auf sämtliche Kontaktmöglichkeiten zwischen Räumen der Röntgenabteilung anwenden.

Formal kann man die Vorgehensweise bei der Bestimmung der Intensitäten wie folgt anschreiben:

$$(5.4.1 - 1) \quad c_{ij} = \sum_{k, l} a_{ijkl} \quad \forall i, j \in OE$$

Dabei stellt a_{ijkl} die Zahl der Kontakte pro Tag zwischen den Räumen i und j dar, die notwendig sind, um die für die Anforderungen k notwendigen Tätigkeiten l auszuführen.

Für das Programm HEROS ist eine Normierung der Intensitäten

auf ganze Zahlen notwendig. Dadurch geht z.B. der Wert 7.98 in den Wert 798 über. Den Kontaktmöglichkeiten $i - j$ zwischen denen entweder üblicherweise kein oder nur selten ein Kontakt besteht, wurde die Intensität 0 zugewiesen. Damit ergibt sich eine Matrix, deren Elemente die Intensitäten c_{ij} darstellen. Diese Matrix wird in HEROS aus Gründen der bequemen Handhabung sequentiell eingelesen. Dabei brauchen nur die von Null verschiedenen Elemente c_{ij} eingegeben werden. Die Reihenfolge ist hierbei beliebig. Tab. 5.4.1 - 2 zeigt diese Eingabedaten.¹⁾

Die Matrix der Elemente c_{ij} ist quadratisch, ihre Diagonalelemente sind gleich Null, da dieses Modell nur Kontakte außerhalb der Organisationseinheiten berücksichtigt.

Kontakt	von	nach	Einheiten
1	1	11	798
2	2	11	1580
3	3	11	300
4	4	11	4041
5	5	11	825
6	6	11	2600
7	1	7	531
8	2	7	1053
9	3	7	200
10	4	7	674
11	5	7	550
12	6	7	1734
13	10	1	200
14	9	2	800
15	9	3	100
16	9	7	2247
17	12	7	300
18	12	10	300
19	8	7	9999

Tab. 5.4.1 - 2: Intensitäten

1) Eine Ausnahme stellt die Verbindung 8 - 7 (Dunkelkammer-Filmauswertung) dar. Hier wurde aus programmtechnischen Gründen der Wert der Intensität mit 9999 angesetzt. In Wirklichkeit wäre er beträchtlich höher. Der Fehler, der dadurch entsteht, ist zu vernachlässigen.

Die Räume sind in obiger Tabelle durch natürliche Zahlen kodiert. Die Zuordnung von Zahlen und Räumen zeigt Tab. 5.4.1 - 3.

1	Durchleuchtungsraum 1	8	Dunkelkammer
2	"	2	9 Befundungsraum
3	"	3	10 Arzttraum
4	Aufnahmeraum 1	11	Warteraum
5	"	2	12 Schreibraum
6	"	3	
7	Filmauswertung		

Tab. 5.4.1 - 3: Kennzeichnung der Röntgenabteilungsräume

Die Flächen der Räume sind in Tab. 5.4.1 - 4 aufgeführt. Es sind vereinfachte Grundrisse gewählt worden, die aber im Ausmaß der Fläche etwa den vorhandenen der Röntgenabteilung¹⁾ entsprechen.

Raum	Fläche
1	48.00
2	48.00
3	48.00
4	48.00
5	48.00
6	48.00
7	24.00
8	24.00
9	24.00
10	24.00
11	48.00
12	24.00

Tab. 5.4.1 - 4: Flächen der Röntgenabteilungsräume

1) Die Flächen der Räume sind größer als aus medizinischen und technischen Gründen notwendig wäre. Vgl. dazu Stromberg v. (1973). Es ist dies die Folge der Tatsache, daß die betrachtete Röntgenabteilung der Medizinischen Klinik der Universität Erlangen-Nürnberg in Räumen untergebracht ist, die für eine andere Leistungsstelle vorgesehen war. Das Layoutproblem wird davon jedoch nicht berührt.

Unter Verwendung der obigen Intensitäten erbrachte ein Rechnerlauf¹⁾ des Programmes HEROS ein gegenüber der ursprünglichen Raumanordnung (Abb. 3.2.2.2.1 - 1) der Röntgenabteilung folgendermaßen verändertes Layout (Abb. 5.4.1 - 1).²⁾

Als wesentliche Verbesserung ist zu bemerken, daß der unbenutzte Raum im ursprünglichen Layout jetzt in die Nutzung einbezogen wurde. Dadurch sind andere Räume flächenmäßig erweitert worden.

Dunkelkammer (Raum 8) und Filmauswertung (Raum 7) liegen nahezu an derselben Stelle günstig unmittelbar nebeneinander. Drastisch ist die Lage des Warteraumes (Raum 11) verändert. Er wurde zentral plaziert. Der Durchleuchtungsraum 3 (Raum 3), der nur geringe Kontaktintensitäten aufweist, wurde aus seiner zentralen Lage entfernt. Der Röntgenraum (Raum 4) mit der höchsten Patientenfrequenz liegt nun gegenüber der Filmauswertung (Raum 7) und unmittelbar anschließend an das Wartezimmer (Raum 11), so daß hier kurze Geh- bzw. Transportwege auftreten. Die Tatsache, daß Raum 10 (Arztraum) hinter Raum 12 (Schreibraum) liegt, ist nicht von Nachteil, da der eine für den leitenden Arzt der Röntgenabteilung vorgesehen ist und der andere gleichzeitig die Funktion des Büros und der Anmeldung wahrnimmt.

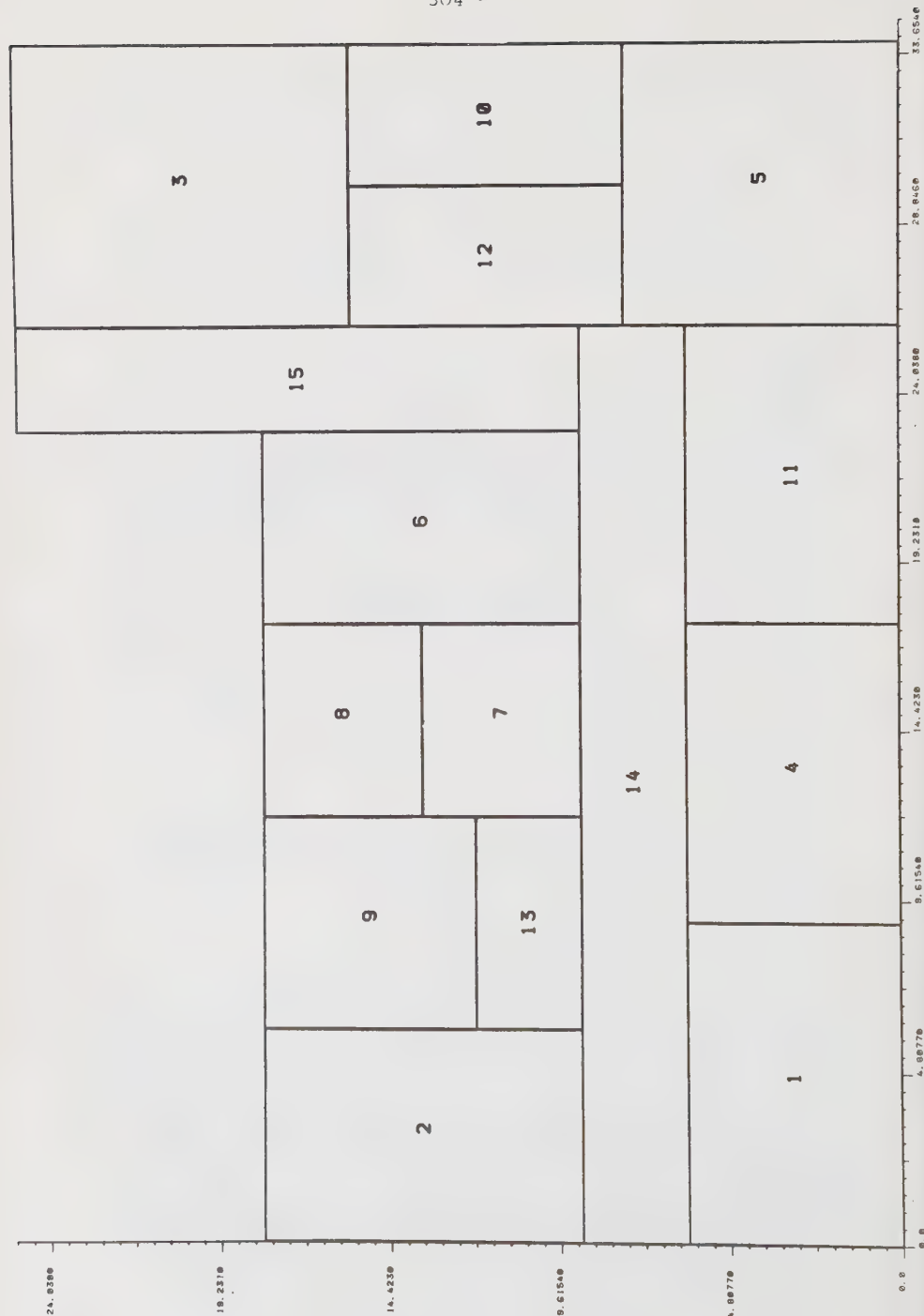
Als Kriterium für die Güte des gefundenen Layouts kann aufgrund des Verfahrens selbst nur der Wert der Zielfunktion (Beziehung 5.4 - 3) - der Transportaufwand - angesehen werden. In diesem Falle ergab sich der Wert

$$2\,900\,558.8 \left[\frac{\text{Transporteinheit}}{\text{Zeiteinheit}} \text{ Meter} \right].$$

Der obige Wert für sich besitzt noch keine Aussagekraft. Vergleicht man ihn jedoch mit dem Wert 4 744 290.0, der sich für den Transportaufwand unter der Voraussetzung der ursprünglichen Raumanordnung (Abb. 3.2.2.2.1 - 1) ergibt, so wird deutlich, daß der Transportaufwand mit einem Layout gemäß Abb. 5.4.1 - 2

-
- 1) Bezüglich Rechenzeit (Größenordnung: 2 Minuten) und Speicheraufwand siehe Hardeck, Schmid (1974), S. 25.
2) Es ist in der Abb. 5.4.1 - 2 zu beachten, daß die Räume 13, 14 und 15 Flure darstellen.

Y - METER



beträchtlich gesenkt wird.

Damit ergibt sich aber eine Zeitersparnis auch für die Erstellung der Einzelleistung. Diese hätte dann einen kosten-senkenden Einfluß.

5.4.2 Layout-Planung mit einem dialogfähigen Verfahren

Dialogfähige Layout-Verfahren haben den Vorteil, daß der Anwender nicht-quantifizierbare Restriktionen in den Planungsvorgang mit einbringen kann. Erhalten bleibt der schnelle und exakte Zuordnungsvorgang des Layout-Algorithmus.

Eine nicht-quantifizierbare Restriktion könnte im Falle der Röntgenabteilung sein, daß aufgrund der baulichen Gegebenheiten ein bestimmtes Röntgengerät nur an einem bestimmten Ort installiert werden kann. Der zugehörige Raum muß dann fest eingeplant werden.

Die folgenden Ergebnisse wurden mittels eines Verfahrens von Hardeck über den Bildschirm eines PDP 15 Rechners gewonnen.¹⁾ Abb. 5.4.2 - 1 und 5.4.2 - 2 zeigen Photographien²⁾ von diesem Bildschirm.

Das ursprüngliche Layout ist in Abb. 5.4.2 - 1 zu sehen. Der unbenutzte Raum ist hier fortgelassen.

Abb. 5.4.2 - 2 stellt ein sowohl gegenüber Abb. 5.4.2 - 1 als auch Abb. 5.4.1 - 2 verändertes Layout dar.

Hier wurde mittels des dialogfähigen Verfahrens zuerst der Raum 1 fixiert und dann die übrigen Räume in der Reihenfolge des jeweiligen Transportaufwandes bezüglich ihrer Kontakte zu den Räumen 7 (Filmauswertung) und Raum 11 (Warteraum) eingeplant.

Diese erzwungene Überbetonung der Kontakte zu Filmauswertung und Warteraum bedeutet, daß diejenigen Tätigkeiten, die unmittelbare Auswirkungen über die Röntgenabteilung hinaus haben (Wartezeit, Verweilzeit der Patienten) stärker gewichtet werden.

1) Hardeck, Nestler (1974), S. 224.

2) Es werden aus Gründen der deutlicheren Darstellung Fotonegative verwendet.

Die Folge ist allerdings eine gegenüber dem HEROS-Lauf schlechtere Zielfunktion von 3 898 058.0 Transporteinheit
Tag Meter]

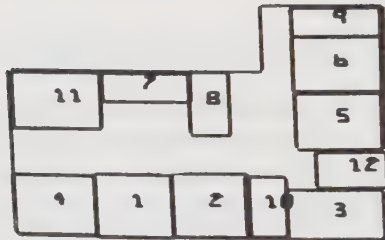


Abb. 5.4.2 - 1: Grundriß der Röntgenabteilung auf dem Bildschirm

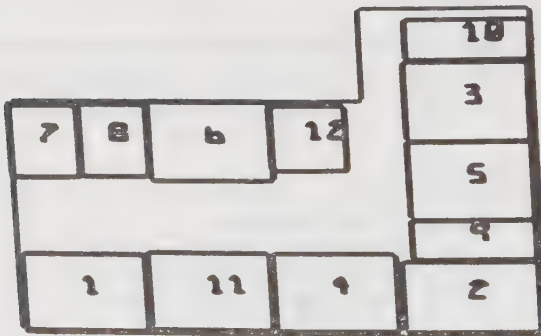


Abb. 5.4.2 - 2: Layout nach Dialogsitzung

Schließlich soll noch das Layout der Röntgenabteilung angegeben werden, wenn der fest vorgegebene Grundriß des Gebäudes entfällt und statt dessen ein beliebiger, d.h. während der Layout-Konstruktionsphase unbestimmter Gebäudegrundriß zulässig ist.

Auch hier wird in einer Dialogsitzung am Bildschirm sequentiell, beginnend mit Raum 1, jeweils derjenige Raum mit dem höchsten Kontakt zu den schon fixierten Räumen so plziert,

daß sein Schwerpunkt möglichst dicht an deren Schwerpunkt zu liegen kommt. In Abb. 5.4.2 - 3 ist eine Photographie des Bildschirms nach Abschluß des Planungsvorganges wiedergegeben.

Wie zu erwarten war, stellt sich ein Zielfunktionswert von 2 274 440.0 ein, der sogar noch unter dem Wert liegt, der mit dem HEROS-Lauf erreicht wurde. Dies ist auf die freie Zuordnung der Räume zurückzuführen.

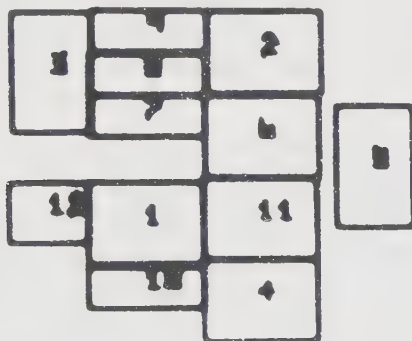


Abb. 5.4.2 - 3: Layout bei freiem Grundriß

5.4.3 Die Ergebnisse der Layoutplanung im Simulationsmodell der Röntgenabteilung von Abschnitt 3.2

Es soll nun noch das durch HEROS gewonnene, verbesserte Layout der Röntgenabteilung, das auf dem gleichen, gegebenen Grundriß des Bautraktes basiert, in das Simulationsmodell der Röntgenabteilung von Abschnitt 3.2 eingegeben werden.

Hierzu sei ein Vergleich der relevanten Entfernungen des ursprünglichen und des verbesserten Layouts angegeben (Tab.

5.4.3 - 1).

	alt	neu
D1 - Schleuse	9.5	8.0 Meter
D2 - Schleuse	10.5	8.0 "
D3 - Schleuse	16.0	12.0 "
A1 - Schleuse	15.0	5.0 "
A2 - Schleuse	22.5	12.0 "
A3 - Schleuse	47.5	6.0 "
Sichtkontrolle	19.5	9.0 "

Tab. 5.4.3 - 1: Entfernungsdaten der Röntgenabteilung

Ein Simulationslauf mit den neuen Werten liefert die in Tab. 5.4.3 - 2 aufgelisteten Ergebnisse. Das Modell befand sich in der Ausgangsversion.

Der Vergleich mit den Werten von Tab. 3.2.5.1 - 1 zeigt, daß eine deutliche Verbesserung zu verzeichnen ist.

Dies bedeutet, daß eine veränderte Anordnungsstruktur der Röntgenräume letztlich eine kostengünstigere Alternative für das Krankenhaus darstellt.

Röntgenraum	mittlere Wartezeit	mittlere, relative Leerzeit
1	12.66	0.03
2	12.28	0.14
3	0.10	0.04
4	30.07	0.04
5	45.15	0.03
6	22.08	0.09

Tab. 5.4.3 - 2: Ergebnisse eines Simulationslaufes des Modells von Abschnitt 3.2 mit geändertem Layout

6. REALISATIONSMÖGLICHKEITEN FÜR ABLAUFPLANUNGSVERFAHREN IM KRAKENHAUS

Die Zahl der realisierten OR-Verfahren in Krankenhäusern ist recht gering. Selbst in den USA - hier existieren eine Reihe von Untersuchungen - sind die meisten Arbeiten entweder rein analytischer oder rein empirischer Natur. Echte Anwendungsfälle sind seltener. Die Gründe hierfür sind vielfältig. Sicher ist das Datenproblem ein besonderes Hemmnis, da kaum ein Krankenhaus über aufbereitete Daten verfügt. Noch problematischer ist die Frage der Kosten, die weder empirisch noch methodisch für das Krankenhaus zufriedenstellend gelöst ist.

Zur Erschwerung der Anwendung von Modellen kommt hinzu, daß eine Fülle von medizinischen Restriktionen zu beachten sind, die in vielen Fällen nicht quantitativ erfaßt werden können.

Oft ist auch eine sehr mangelhafte Verständnisbereitschaft und Kommunikationsfreudigkeit von Seiten des Personals, insbesondere der Ärzte gegenüber Außenstehenden zu verzeichnen. Dies erschwert natürlich die Arbeit derer, die Probleme analysieren und Lösungsvorschläge erarbeiten sollen beträchtlich.

Ein weiterer Grund für geringe Anwendungshäufigkeit von OR-Verfahren ist darin zu sehen, daß sie sich schon aufgrund des umfangreichen Datenmaterials in der Regel einer EDV-Anlage bedienen müssen (eventuell sogar dialogfähig sind). Diese Voraussetzung ist aber nur in einer sehr geringen - allerdings wachsenden - Zahl von Krankenhäusern gegeben.

Als letztes wäre schließlich noch anzuführen, daß allgemein die Möglichkeit der Lösung aktueller Probleme der Krankenhäuser mittels quantitativer Methoden noch nicht recht erkannt wurde.

Wo einige dieser Hemmnisse beseitigt werden können, ist die Realisation von OR-Verfahren im Krankenhaus möglich.¹⁾

Pilotprojekte in den Krankenhäusern in Kulmbach, Moers, Mün-

1) Vgl. auch Eichhorn II, 1974, S. 120 f.

chen-Großhadern, Herford stützen sich auf Zentralrechner, die wesentliche Funktionen wie Dokumentation der Leistungsverordnung, Rechnungswesen u.v.a.m. übernehmen sollen.¹⁾

Darauf aufbauend könnten Algorithmen zur Steuerung des Ablaufs auf den verschiedenen Stufen angelagert werden. Die Forderung nach aufbereiteten Daten ist hier ebenfalls - wenigstens teilweise - zu erfüllen, da es keine Schwierigkeiten bereitet, z.B. Anforderungsstatistiken auf Massespeichern mitzuführen.

Selbstverständlich brauchen bestimmte OR-Verfahren wie z.B. Simulation, die zumindest für einige Zeit mit einem einmaligen Entscheidungsvorgang abgeschlossen sind, nicht auf einem krankenhauseigenen Rechner ausgeführt zu werden.

Einige Methoden, hauptsächlich analytischer Art, können auch ganz auf die Unterstützung großer Rechner verzichten.

Unumgänglich sind wohl in jedem Fall Datenerhebungen bzw. Schätzungen von Tätigkeitsdauern, Materialverbrauch und Anforderungsanfall.

Besonders günstig sind die Realisationschancen bezüglich erprobter Verfahren, für die Softwarepakete existieren.

Dies trifft für die Lineare Programmierung, für die Netzplantechnik, für Layout-Verfahren²⁾, teilweise für die Lagerhaltung zu.

Sind keine der vorhandenen Verfahren anwendbar, besteht unter Umständen die Möglichkeit, zumindest erprobte Techniken anzuwenden (z.B. ereignisorientierte Simulation³⁾) bzw. theoretisch hinreichend untersuchte Methoden gemäß den Anforderungen des gegebenen Problems zu modifizieren.⁴⁾

1) Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (1975), S. 148 ff.

2) Vgl. hierzu Abschnitt 5.4.

3) Vgl. hierzu Abschnitt 3.2.

4) Vgl. Abschnitt 4.

L I T E R A T U R V E R Z E I C H N I S

- Adam, D.: Krankenhausmanagement im Konfliktfeld zwischen medizinischen und wirtschaftlichen Zielen, Wiesbaden, 1971
- Adam, E. E., Berry, W. L., Whybark, D. C.: Forecasting Demand for Medical Supply Items Using Exponential and Adaptive Smoothing Models, Paper No. 381, Krannert Graduate School of Industrial Administration, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1972
- Aitchison, J., Brown, J. A. C.: The Lognormal Distribution, Cambridge, 1969
- Alter, U.: Kosten-Nutzen-Analysen im Gesundheitswesen, Batelle-Institut, Information 17, Frankfurt, 1973
- Ammende, H. P.: Computer-kontrollierte Isotopen-Lagerhaltung, Angewandte Informatik, 14. Jg., 1972, S. 469 ff.
- Ashour, S., Parker, S. G.: A Precedence Graph Algorithm for the Shop Scheduling Problem, Operational Research Quarterly, Vol 22, 1971, S. 165 ff.
- Bakshi, M. K., Arora, S. R.: The Sequencing Problem, Management Science, Vol 16, 1969, S. B-246 ff.
- Balas, E.: Machine Sequencing via Disjunctive Graphs, an Implicit Enumeration Algorithm, Carnegie-Mellon-University, Management Sciences Research Report No. 125, Pittsburg, Pennsylvania, 1970
- Banerjee, B. P.: Simple Facility Sequencing with Random Execution Times, Operations Research Vol 13, 1965, S. 358 ff.
- Baron, R., Rising, E. J.: Clinical Appointment Systems with CRT Terminals, Referat auf dem ORSA/TIMS meeting, Atlantic City, 1972
- Barrett, J. P. u.a.: Evaluation of the Implementation of a Medical Information System in a General Community Hospital, Battelle Research Report, Columbus, Ohio, 1975
- Baur, K.: Betriebsmittelzuordnung bei der Fabrikplanung, Mainz, 1972
- Beenhakker, H. L.: Multiple Correlation - A Technique for Prediction of Future Hospital Bed Needs, Operations Research, Vol 11, 1963, S. 824 ff.

- Beggs, S. u.a.: Evaluation of a System for On-line Computer Scheduling of Patients Care Activities, Computers and Biomedical Research, 4, 1971, S. 634 ff.
- Bergen, R.: OR-Aktivitäten der Einheit Operations Research (TU Berlin) im Gesundheitswesen, Referat auf der Tagung der Arbeitsgruppe "OR im Gesundheitswesen" der DGOR, Nürnberg, 1975
- Bernau, E.-F.: Planung der Lagerhaltung von Nukliden am Beispiel des Stadt- und Kreiskrankenhauses Kulmbach, Dipl.Arb., Nürnberg, 1976
- Bernau, E.-F., Gierl, L., Schläger, W.: Lagerhaltung von Radio-diagnostik im Krankenhaus, Arbeitspapiere Heft 43, Betriebswirtschaftliches Institut der Universität Erlangen-Nürnberg, Nürnberg, 1976
- Blau, R. A.: N-Job, One Machine Sequencing Problems under Uncertainty, Management Science, Vol 20, 1973, S. A-101 ff.
- Box, G. E. P., Muller, M. E.: A Note on the Generation of Random Deviates, Annals of Math. Statistics, 1958, S. 610 ff.
- Brauer, E. M.: Computer gestützte Ablaufsteuerung in Krankenhäusern, Referat auf der Tagung der GMDS in Göttingen am 28.5.1974, Göttingen, 1974
- Britske, H. A.: Zwischenbericht der Arbeitsgruppe kaufmännisches Rechnungswesen über die Erstellung eines Arbeitsprogrammes für die Einführung des kaufmännischen Rechnungswesens in den Klinika der Freien Universität Berlin, Berlin, 1975
- Brodheim, E., Derman, C., Prastocos, G.: On the Evaluation of a Class of Inventory Policies such as Blood, Management Science, Vol 21, 1975, S. A-1320 ff.
- Bundesregierung: Bericht der Bundesregierung über die Auswirkungen des Gesetzes zur wirtschaftlichen Sicherung der Krankenhäuser und zur Regelung der Krankenhauspflegesätze (KHG), Drucksache 7/4530, Deutscher Bundestag, Bonn, 1975
- Bund-Länder-Kommission: Konzept einer Betriebsabrechnung, o.Jhr.
- Cederlund, C.: Termin- und Arbeitsplanung in einem Krankenhaus in Schweden, Datenverarbeitung und Medizin, IBM Seminar, Bad Liebenzell, 1970

- Charlton, J. M., Death, C. C.: Generalized Machine-Scheduling Algorithm, Operational Research Quarterly, Vol 21, 1970, S. 127 ff.
- Charnes, A. u.a.: Past, Present and Future of Large Scale Transshipment Computer Codes and Applications, Computers and Operations Research, Vol 2, 1975, S. 71 - 81
- Crabill, Th. B., Maxwell, W. L.: Single Machine Sequencing with Random Processing Times and Random Due-Dates, Naval Research Logistics Quarterly, Vol 16, 1970, S. 549 ff.
- Cramer, H.: Mathematical Methods of Statistics, Princeton, 1971
- Day, J. E.: Review of Sequencing Research, Naval Research Logistics Quarterly, Vol 17, 1970, S. 11 ff.
- Denner, G.: Planung der Belegung von OP-Sälen am Beispiel des Kreiskrankenhauses Kulmbach, Eine empirische Studie, Dipl.Arb., Nürnberg, 1975
- Der Spiegel: Krankheitskosten: "Die Bombe tickt", Der Spiegel, Nr. 19, 1975, S. 57 ff.
- Diegelmann, E.: Ein Algorithmus zur Bestimmung von Grundrüstformen, Ein Beitrag zur Ablaufplanung für die Variantenfertigung auf Flußlinien mit Zeitzwang, Dipl.Arb., Nürnberg, 1975
- Dörken, W.: Simulationsmodelle und ihre Anwendung bei der Analyse von Prioritätsregeln zur Maschinenbelegungsplanung, Die Arbeitsvorbereitung 1973, Heft 3, S. 89 ff. und Heft 4, S. 27 ff.
- Duncan, F. B., Norwich, H. S.: Opportunity Costs and Elementary Inventory Theory in the Hospital Service, Operational Research Quarterly, Vol 24, 1973, S. 27 ff.
- Eichhorn, P.: Grundlagen einer gemeinwirtschaftlichen Erfolgsrechnung für Unternehmen, Schriftenreihe Gemeinwirtschaft Nr. 15, Frankfurt, 1974
- Eichhorn, S.: Krankenhausbetriebslehre I, Stuttgart, 1973
- Eichhorn, S.: Krankenhausbetriebslehre II, Stuttgart, 1974
- Elsholz, K., Krankenhausfinanzierungsgesetz und Bundespflegesatzverordnung, Baden-Baden, 1974

- Fetter, R. B., Thompson, J. D.: The Simulation of Hospital Systems, Operations Research, Vol 13, 1965, S. 689 ff.
- Fichtner, F.: Ablaufplanung für ein klinisch-chemisches Labor mittel Methoden des Operations Research, Dipl.Arb., Nürnberg, 1976
- Fischer, D.: Optimale Größe von Krankenhäusern, Referat auf der Tagung der Arbeitsgruppe "OR im Gesundheitswesen" der DGOR, Nürnberg, 1975
- Florian, M., Trepant, P., McMahon, G.: An Implicit Enumeration Algorithm for the Machine Sequencing Problem, Management Science, Vol 17, 1971, S. B-782 ff.
- Frankfurter, G. M., Kendall, K. E., Regels, C. C.: Management Control of Blood Through a Short-Term Supply-Demand Forecast System, Management Science, Vol 21, 1974, S. B-444 ff.
- Gemeinschaftskrankenhaus Herdecke: Die Struktur des gemeinnützigen Gemeinschaftskrankenhauses Herdecke, Herdecke, 1975
- Geoffrion, A. M., Marsten, R. E.: Integer Programming Algorithms: A Framework and State-of-the-Art Survey, Management Science, Vol 18, 1972, S. 465 ff.
- Gerthsen, Chr., Kneser, H. O.: Physik, Berlin, 11. Aufl., 1971
- Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH: Projekt Datenverarbeitung in der Medizin, München, 1975
- Gierl, L.: Ablaufplanung im Krankenhaus mittels Simulation am Beispiel der Röntgenabteilung der Medizinischen Klinik der Universität Erlangen-Nürnberg, Arbeitspapier Heft 28, Betriebswirtschaftliches Institut der Universität Erlangen-Nürnberg, Nürnberg, 1975
- Goldman, J., Knappenberger, H. A., Moore, E. W.: An Evaluation of Operation Room Scheduling Policies, Hospital Management, 1969, S. 40 ff.
- Golenko, D. T.: Statistische Methoden der Netzplantechnik, Stuttgart, 1972
- Gorenstein, S.: An Algorithm for Project (Job) Sequencing with Resource Constraints, Operations Research, Vol 20, 1972, S. 835 ff.

- Goyal, S. K.: Lot Size Scheduling on a Single Machine for Stochastic Demand, Management Science, Vol 19, 1973, S. A-1322 ff.
- Greenberg, H. H.: A Branch and Bound Solution for the General Scheduling Problem, Operations Research, Vol 16, 1968, S. 353 ff.
- Gupta, J. N. D.: A General Algorithm for the nxM Flowshop Scheduling Problem, The International Journal of Production Research, Vol 7, 1969, S. 241 ff.
- Hahn, R.: Produktionsplanung bei Linienfertigung, Berlin, New York, 1972
- Hähnchen, K.: Zu den Betriebskosten der Strahlenabteilung, Das Krankenhaus, Jhrg. 65, 1973, Heft 7, S. 277 ff.
- Hardeck, W., Nestler, H.: Aus der Praxis der Layoutplanung mit EDV, Wt-Zeitschrift für die industrielle Fertigung, Jg. 64, 1974, S. 95 ff.
- Hardeck, W., Schmid, M.: Rechnerunterstützte Raumplanung - eine praktische Anwendung des Verfahrens von Günther -, Arbeitspapiere, Betriebswirtschaftliches Institut der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Heft 20, Nürnberg, 1974
- Heinen, E.: Industriebetriebslehre, Wiesbaden, 1972
- Heinhold, J., Gaede, K.-W.: Ingenieur-Statistik, München-Wien, 1972
- Hertle, F. H., Knick, B.: Arbeitsbericht 1970 - 1975, Deutsche Klinik für Diagnostik, Wiesbaden, 1975
- Hetzke, E., Handreg, W.: Statistische Untersuchung zur Problematik der Behandlungszeiten und der Gesamtzahl der Patienten, dargestellt an neun Fachabteilungen einer Poliklinik, Zeitschrift für ärztliche Fortbildung, 65. Jg., H 6, S. 329 ff.
- Hill, W.: Unternehmensplanung, Stuttgart, 1966
- IBM: Einführung in das Modell ORBYD, IBM Form, E 12 - 1226 - 1, 1974
- Jacob, H.: Anwendung der Netzplantechnik im Betrieb, Wiesbaden, 1969
- Jennings, J. B.: Blood Bank Inventory Control, Management Science, Vol 19, 1973, S. B-637 ff.

- Kaerkes, R.: Ergebnisse der Theorie der Netzpläne mit stochastisch verteilten Vorgangsdauern, in: Proceedings in Operations Research 5, hrsg. von J. Kohlas u.a., Würzburg, 1976
- Kao, E. P. C.: Modeling the Movement of Coronary Patients within a Hospital by Semi-Markov-Processes, Operations Research, Vol 22, 1974, S. 683 ff.
- Kilbride, M., Wester, L.: The Balance Delay Problem, Management Science, Vol 8, 1962, S. 69 ff.
- Kohlschreiber, P.: Auswertung von Patientendaten der medizinischen Klinik der Universität Erlangen-Nürnberg für die optimale Planung der Bettenbelegung, Dipl. Arb., Nürnberg, 1974
- Kolesar, P.: A Markovian Model for Hospital Admission Scheduling, Management Science, Vol 16, 1970, S. B-384 ff.
- Kolisek, M. J.: Inventory Control in a Clinical Laboratory, USAMC Intern Training Center, Red River, Army Depot, Texarkana, Texas, 1973
- Krone, M. J., Steiglitz, K.: Heuristic-Programming Solution of a Flowshop-Problem, Operations Research, Vol 22, 1974, S. 629 ff.
- Küpper, H. u.a.: Stochastische Netzwerke und ihre Darstellung durch GPSS, Angewandte Informatik, Jhr. 16, 1974, S. 243 ff.
- Lacronique, M.: Automatization of Radiological Records, Methods of Information in Medicine, Vol 10, 1971, S. 30 ff.
- Lanzenauer, C. H.: A Linear Programming Solution to the General Sequencing Problem, Canadian Operational Research Society Journal, Vol 8, 1970, S. 129 ff.
- Leustra. J. K., Rinnoy Kan, A. H. G.: Some Simple Applications of the Travelling Salesman Problem, Operational Research Quarterly, Vol 26, 1975, S. 717 ff.
- Lienhard, H., Steiger, F., Weber, K.: Planspiel Elektrizitätswirtschaft, Bern, 1975
- Liesegang, D. G.: Möglichkeiten zur wirkungsvollen Gestaltung von Branch-and-Bound-Verfahren, dargestellt an ausgewählten Problemen der Reihenfolgeplanung, Diss., Köln, 1974

- Liesegang, D. G., Schirmer, A.: Heuristische Verfahren zur Maschinenbelegungsplanung bei Reihenfertigung, Zeitschrift für Operations Research, Band 19, 1975, S. 195 ff.
- Lipschutz, S.: General Topology, New York, 1965
- Little, J. D. C., Murty, K. G., Sweeny, D. W. Karel, C.: An Algorithm for the Travelling Salesman Problem, Operations Research, Vol 11, 1963, S. 972 ff.
- Lohfert, Ch.: Die betriebliche Steuerung von Krankenhäusern, Sonderdruck aus Der Krankenhausarzt, 45. Jg., 1972
- Lutz, H.: Die Steuerung von Leistungsstellen mit Hilfe operationsanalytischer Verfahren, Datenverarbeitung in der Schriftenreihe Medizin, Arbeitsbericht, Siemens AG, Erlangen, 1976
- Manne, A. S.: On the Job-Shop Scheduling Problem, in: Industrial Scheduling, hrsg. von J. F. Muth, G. L. Thompson, Englewood Cliffs, 1963, S. 187 ff.
- Massow, H. v.: Transportanalysen im Krankenhaus, Industrielle Organisation, Jg. 42, 1973, S. 375 ff.
- Matt, G.: Ein lernfähiges Modell zur Bestimmung von Zusammenhängen anhand beobachteter Daten, IBM-Sonderdruck, Sindelfingen, o.Jhrq.
- Matthes, W.: Terminierungsmodelle für klinische Prozesse I - III, Beiträge zur Unternehmensforschung, Institut für Unternehmensführung, Fachgebiet Unternehmensforschung der Freien Universität Berlin, Heft 4 und 5, Berlin, 1973
- Maxwell, W. L.: State of the Art in Job Shop Sequencing, in: Production and Inventory Management, American Production and Inventory Control Society, 10, 1969, S. 54 ff.
- Mensch, G.: Ablaufplanung, Köln und Opladen, 1968
- Meyer, M.: Bewertung medizinischer Leistungen in Entscheidungsmodellen, Referat auf der Tagung der DGMS, AG "OR im Gesundheitswesen", München, 1976
- Meyer, M., Hansen, K., Rohde, M.: Mathematische Planungsverfahren I, Essen, 1973

- Meyer, M., Hansen, K., Klausmann, H.-S.: Mathematische Planungsverfahren II, Essen, 1975
- Meyer, M., Schläger, W.: Ablaufplanung im Krankenhaus mit Hilfe von Operations Research-Modellen, in: Die Unternehmung in ihrer gesellschaftlichen Umwelt, hrsg. von P. Mertens, Wiesbaden, 1975, S. 121 ff.
- New, C. C.: A Common Error in Production Scheduling, Operational Research Quarterly, Vol 25, 1974, S. 283 ff.
- Niedereichholz, J.: Zur Simulation statischer Job Shop Modelle mit GPSS, Angewandte Informatik, Jhr. 12, 1970, S. 394 ff.
- Niemeyer, G.: Die Simulation von Systemabläufen mit Hilfe von FORTRAN IV, De Gruyter, Berlin, 1972
- Oberhofer, F.: Analyse der Leistungs- und Kostenstruktur in Akut-Krankenhäusern, Das Krankenhaus, Jg. 65, Febr. 1973, Heft 2, S. 57 ff.
- Pauly, M., Redish, M.: The Non-For-Profit Hospital as a Physicians' Cooperative, American Economic Review 63, 1973, S. 87 ff.
- Pflanzagl, J.: Allgemeine Methodenlehre der Statistik I, Berlin, 1972
- Probst, W.: Die Übertragung betrieblicher Kostenrechnungsverfahren in den Krankenhausbereich, Dipl. Arb., Nürnberg, 1973
- Rehm, H.: Empirische Untersuchungen über die Zulässigkeit von Beta-Verteilungen für die Aktivitätsdauern in PERT Netzwerken, Dipl. Arb., Nürnberg, 1973
- Riester, W. F., Schwinn, R.: Projektplanungsmodelle, Würzburg, 1970
- Robinson, G. H. u.a.: The Physician as an Estimator of Hospital Stay, Human Factors, 1966, S. 201 ff.
- Rödder, W., Hueck, D.: Analyse der Einsatzstrategie der ADAC-Straßenwacht auf Bundesautobahnen mittels Simulation, Zeitschrift für OR, Band 19, 1975, S. B-215 ff.
- Röntgenverordnung: Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen (Röntgenverordnung - RöV), Siegburg, 1973

- Rothkopf, M. H.: Scheduling with Random Service Times, Management Science, Vol 12. 1966, S. 707 ff.
- Rubow, G.: Die Lösung von Reihenfolgeproblemen aus dem Bereich der Maschinenbelegungsplanung mit Hilfe des Branch-and-Bound Algorithmus, Würzburg, 1969
- Schmidt, B.: GPSS/FORTRAN Simulator, Skriptum, Erlangen, 1973
- Schmidt-Jensen, H. G.: Anhaltzzahlen für den Personaleinsatz in der Strahlendiagnostik als Instrument der Arbeitsdisposition, Das Krankenhaus, Sept. 73, S. 370 ff.
- Schmidt, J.: Mengenlehre I, Mannheim, 1966
- Schmitz, H. H., Kwak, N. K.: Monte Carlo Simulation of Operating-Room and Recovery-Room Usage, Operations Research, Vol 20, 1972, S. 1171 ff.
- Schneeweiß, H.: Entscheidungskriterien bei Risiko, Berlin, 1967
- Schneider, D. P., Kilpatrick, K. K.: An Optimum Man-Power Utilisation Model for Health Maintenance Organization, Operations Research, Vol 23, 1975, S. 869 ff.
- Scholmer, J.: Patient und Profitmedizin, Opladen, 1973
- Schreiber, R.: Die Notfallambulanz des Stadt- und Kreiskrankenhauses Kulmbach und ihr Einfluß auf dessen Leistungsstellen. Dargestellt im Rahmen des Demonstrations-DV-Projektes für das allgemeine Krankenhaus (DEPAK), Dipl. Arb., Nürnberg, 1975
- Scriabin, M., Vergin, R.C.: Comparison of Computer Algorithms and Visual Based Methods for Plant Layout, Management Science, Vol 22, 1975, S. 172 ff.
- Seeler, H.-J.: Zu wenig Geld, zu viele Betten, Die Zeit, Nr. 41, 1973, S. 67
- Seeling, R., Spelde, H. G.: Verfahren zur direkten Berechnung von stochastischen Netzplänen, in: Proceedings in Operations Research 5, hrsg. von J. Kohlas u.a., Würzburg, 1976, S. 221 ff.
- Smith, W. G., Solomon, M. B.: A Simulation of Hospital Admission Policy, Communication of the ACM, Vol 9, 1966, S. 362 ff.

- Statistisches Bundesamt: Handbuch der Internationalen Klassifikation der Krankheiten, Verletzungen und Todesursachen (ICD), hrsg. vom Statistischen Bundesamt, 8. Rev. Bd. II, Stuttgart, Mainz, 1968
- Steinmann, H. u.a.: Betriebswirtschaftslehre in praktischer Absicht, Betriebswirtschaftliches Institut der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Arbeitspapiere, Heft 30, 1975
- Stockholms Läns Lansting: Aktuelle Beschreibung des medizinischen Informationssystems, Stockholm, 1972
- Störmer, H.: Semi-Markov-Prozesse mit endlich vielen Zuständen, Lecture Notes in Operations Research and Mathematical Systems, Vol 34, Berlin, 1970
- Stromberg, G. v.: Definition einer leistungsfähigen Strahlenabteilung und Gedanken zum Standard-Röntgenraum, MEDITA, 3. Jg., 1973, S. 22 ff.
- Taha, H. A.: Operations Research, New York, 1971
- Tasto, M.: Automatische digitale Röntgenbilddauswertung, in Forschung '74, Frankfurt, 1973, S. 199 ff.
- Thurn, P., Bücheler, E.: Einführung in die Röntgendiagnostik, Stuttgart, 1974
- Treichel, J., Hirsch, M.: Erfahrungen mit der routinemäßigen Anwendung einer automatisierten Röntgenbefundung (System ORVID), Methods of Information in Medicine, Vol. 9, 1970, S. 177 ff.
- Trivedi, V. M.: A Branch and Bound Algorithm for Optimal Allocation of Float Nurses, Management Science, Vol. 22, 1976, S. 972 ff.
- Türks, M.: Methoden der Bestandssteuerung, Referat anlässlich des Workshop "Anwendungen von OR in der Medizin" der Sektion IV der Arbeitsgruppe Medizinische Informatik der Deutschen Gesellschaft für Medizinische Dokumentation und Statistik, Göttingen, 1974
- Vora, J. A.: Heuristics and Optimizing Techniques Applied to Long Range Facility Planning for Hospital Ancillary Departments, Management Science, Vol 21, 1974, S. B-409 ff.
- Warner, M. D., Prawda, J.: A Mathematical Programming Model for Scheduling Nursing Personal in a Hospital, Management Science, Vol 19, 1972, S. B-411 ff.

- Wetzel, W.: Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Zeitreihenanalyse, Göttingen, 1970
- Whitston, C. W.: An Analysis of the Problems of Scheduling Surgery, Hospital Management, Vol 99, 1965, April S. 58 ff. und May S. 45 ff.
- Xarlis, G.: Untersuchung der Zusatzbelastung des EDV-Systems im Krankenhaus Kulmbach beim Einsatz von Bildschirmen auf den Stationen, Dipl.Arb., Nürnberg, 1976

Lebenslauf

28. 10. 1942	geboren in München
September 1949 bis Juli 1953	Volksschule in Hechendorf
1953 bis 1963	Besuch der Oberschule
Oktober 1963 bis September 1965	Soldat bei der Bundeswehr, zuletzt als Leutnant
Oktober 1965 bis Februar 1971	Studium der Nachrichtentechnik an der Technischen Hochschule in München
Februar 1971 bis Juli 1973	wissenschaftlicher Bearbeiter bei der Industrieanlagenbetriebs- gesellschaft in Ottobrunn
seit Juli 1973	wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Betriebswirtschafts- lehre, insbesondere Operations Research bei Prof. Dr. M. Meyer

